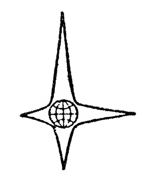

В МИРЕ НАУКИ И ТЕХНИКИ
НТ
Л. ЖЕРАРДЕН
БИОНИКА



ИЗДАТЕЛЬСТВО
«МИР»

LUCIEN GÉRARDIN

LA BIONIQUE

PARIS 1968

ЛЮСЬЕН ЖЕРАРДЕН

БИОНИКА

Перевод с французского
М. Н. Ковалевой

Под редакцией
и с предисловием
проф. В. И. Гусельникова

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
МОСКВА 1971

Жерарден Л.

Ж59 Бионика. Перев. с франц. М. Н. Ковалевой. Ред. и предисл. проф. В. И. Гусельникова. М., «Мир», 1971.

232 с. с илл. (В мире науки и техники)

В доступной и увлекательной форме автор рассказывает об одной из современных синтетических наук — бионике, рассматривая возникновение последней как логическое следствие дифференциации и специализации различных наук. Автор знакомит читателя с основами теории информации, определяет понятия «системы», моделирования, освещает такие сложные вопросы, как связь обучения и самоорганизации в живых системах, проблема биологической памяти и др.

Живое изложение материала, остроумные схемы и отличные фотографии делают книгу крайне интересной и полезной широкому кругу читателей — от школьника и студента до специалиста любого профиля.

2-10-2
171-71

591.1

Редакция научно-популярной и научно-фантастической литературы

ОТ РЕДАКТОРА РУССКОГО ИЗДАНИЯ

Одна из самых молодых наук — бионика — переживает сейчас период быстрого развития и становления.

Нередко бывает, что в период становления молодой науки, как это видно и на примере бионики, ученые пытаются найти в новом панацею для решения кардинальных научных проблем, а когда это оказывается невозможным, они проникаются неоправданным скепсисом. К чести биоников надо сказать, что по мере расширения бионических исследований быстрый переход от чрезмерных надежд к скепсису теперь становится более редким явлением. Все больше ученых самого различного профиля приобщаются к бионическим исследованиям, все зримее достижения этой науки, особенно когда дело касается создания конкретных технических устройств, применимых для практических целей.

Находясь на стыке различных наук, бионика вовлекает в свои ряды самых разных специалистов: инженеров, конструкторов, биологов, химиков, кибернетиков, нейрофизиологов, физиков, психологов и многих других. Поэтому отдельные направления в бионике постепенно дифференцируются, все четче обрисовываются их цели, конкретнее ставятся задачи, связанные с разработкой той или иной проблемы. Вряд ли кого-то удивит, если через некоторое время от общей бионики отпочкуются дочерние науки со своими задачами и своими методами исследования, например нейробионика (как это произошло в кибернетике с появлением нейрокибернетики).

Аспекты бионических работ так широки и многогранны, что назрела необходимость некоторого их упорядочения. И прежде всего здесь нужно выделить главные направления, требующие безотлагательной разработки.

В какой-то мере этому будет способствовать и популяризация достижений бионики. Это позволит буду-

щим исследователям — нынешним студентам и школьникам — приобщиться к поистине безграничным возможностям творческого научного поиска в области бионики и, быть может, предопределит выбор их специальности.

Популяризация науки — задача сложная, особенно когда речь идет о новых направлениях. В этом случае важно не только выбрать яркие, выигрышные факты, но и в доступной, увлекательной форме преподнести читателю сухой и сложный материал, необходимый для правильного понимания сущности новой науки.

В последние годы в нашей стране и за рубежом появилась целая серия научно-популярных книг, посвященных проблемам бионики. Среди советских авторов прежде всего необходимо упомянуть Л. И. Крайзмера, А. И. Прохорова и И. Б. Литинецкого*. В книгах, посвященных новой науке, использован большой фактический материал. Из переводных изданий можно рекомендовать книгу Винцента Мартека «Бионика», которая вышла на русском языке в издательстве «Мир» (1967).

Возникает вопрос, так ли уж нужны новые популярные книги по бионике и не достаточно ли тех, которые изданы. Безусловно, они нужны, во-первых, потому, что все вышеуказанные издания давно разошлись, а некоторые из них даже стали библиографической редкостью, и, во-вторых, потому, что предмет бионики многогранен и обширен и каждая очередная работа не только открывает новые области приложения знаний, но и помогает нам взглянуть на факты с новой стороны.

Именно с этих позиций и интересна книга Люсьена Жердена. Заслуга автора прежде всего в том, что он сумел в доступной форме рассказать о таких сложных вопросах, как понятие информации, ее измерение и кодирование, теория сложных систем и моделирование, понятия обучения, самообучения и самоорганизации, проводя при этом четкую грань между кибернетикой и бионикой и не смешивая задачи этих близ-

* Л. И. Крайзмер, Бионика, Госэнергоиздат, М., 1962; А. И. Прохоров, Инженер учится у природы, изд-во «Знание», М., 1967; И. Б. Литинецкий, Беседы о бионике, изд-во «Наука», М., 1968.

ких наук, во многом базирующихся на одних и тех же теоретических основах.

Через все главы книги автор проводит мысль о необходимости более углубленного комплексного исследования функций центральной нервной системы. И это не случайно. Ведь первые крупные успехи бионики в моделировании органов чувств опирались на фактические данные, полученные физиологами при изучении механизмов работы периферических отделов анализаторов, например сетчатки. Именно эти данные явились базой для создания технических устройств, ныне уже широко используемых в практических целях. Но моделирование механизмов работы периферических отделов анализаторов — это только первый шаг, так как основной анализ и синтез сигналов внешнего мира осуществляется мозгом. Вот почему дальнейший прогресс, безусловно, ограничивается тем, что нам еще неизвестны основные принципы переработки мозгом информации, получаемой от рецепторов. Так, например, хотя мы уже умеем создавать сложнейшие модели, воспроизводящие принцип действия живых систем — даже такой сложной, как сетчатка, — вряд ли это перспективный путь создания бионических устройств и систем, используемых для распознавания зрительных образов.

Конечно, это не значит, что инженеры прекратят работу над созданием машин, передающих или распознающих изображения (ведь без всякого участия бионики был изобретен телевизор).Однако успехи в нейрофизиологии центральных механизмов зрения, безусловно, приведут к принципиально новым идеям в этой области техники. Другой пример — локационные устройства, созданные поначалу независимо от работы биологов. Изучение структуры эхо-локационного сигнала у летучих мышей впоследствии натолкнуло специалистов на мысль о создании более совершенных локационных систем. Только теперь становится очевидным, что изучение одной лишь структуры сигнала «живых локаторов» без понимания механизмов его изменений во время обычного полета или активного поиска не может привести к решению насущных задач, стоящих перед конструкторами локационных приборов. Только теперь мы понимаем, что необхо-

димо детально знать физиологию «приемников» отраженных сигналов, и особенно центральных — мозговых механизмов их переработки, приводящих к адекватной реакции животного. Вот почему изучение деятельности эхо-локационного аппарата летучих мышей и других животных как органа пространственного анализа привлекает все большее внимание биологов и инженеров.

Автор не без основания подчеркивает, что использование самых различных методических приемов при изучении деятельности мозга открывает для бионики безграничные возможности. В этом отношении книга Жерардена выгодно отличается от ряда других научно-популярных изданий.

Однако при любом популярном изложении сложных теоретических вопросов возможны неточности. У Жердена нельзя признать удачными отдельные места в разделах, посвященных аккомодации, цветовому зрению, восприятию животными магнитного поля Земли. Стремление максимально упростить сложные проблемы подчас приводит автора к поверхностному описанию явлений, которые могут быть понятны только специалисту и ни о чем не говорят неподготовленному читателю. Пытаясь максимально сохранить авторский текст, мы только в некоторых случаях дали необходимые примечания. Мелкие просчеты автора не умаляют значительности книги в целом. Она пользуется заслуженным вниманием за рубежом, была переведена на английский язык. Книга прекрасно иллюстрирована. Чувствуется, что она написана человеком, влюбленным в свою специальность и с научной объективностью раскрывающим перед читателем горизонты бионики. Можно надеяться, что и советский читатель оценит ее по достоинству.

В. И. Гусельников

ГЛАВА 1

ЧТО ТАКОЕ БИОНИКА

НЕОБХОДИМОСТЬ НАУК-ПЕРЕКРЕСТКОВ *

Грандиозное расширение объема человеческих знаний привело к сложнейшему разветвлению древа наук. Всего сто лет назад можно было считать, что вся физика исчерпывается термодинамикой, оптикой и электричеством. Теперь эта прекрасная простота позади. В наше время уже никто не станет претендовать на исчерпывающее знание хотя бы одной оптики: целая пропасть лежит между инженером, который рассчитывает характеристики фотообъективов, и ученым, исследующим красные излучения лазеров. Специалист замкнулся в своей узкой области, сужающейся с каждым днем все больше и больше.

В 1959 году Д. Тикунер опубликовал каталог современных наук, расположив их в алфавитном порядке. Он перечислил 1150 названий, но сейчас к ним спокойно можно прибавить еще не один десяток. Это разветвление наук неуклонно продолжается: растет армия ученых, занимающихся науками, число которых непрерывно возрастает.

Что это принесет — добро или зло? Не таит ли в себе чрезмерная специализация крупицу того яда, который в конце концов может парализовать самый прогресс науки? На этот вопрос очень трудно ответить. Конечно, специалист отлично разбирается во всем, что касается его специальности, но та область науки, в которой он работает, становится угрожающе узкой. Один ученый великолепно знает свойства некоторых сплавов железа, другой — единственный зна-

* «Науками-перекрестками» автор здесь называет синтетические науки, лежащие на стыке разных наук, например биологии, математики, электроники, механики и т. п. К синтетическим наукам относится и бионика, так как она объединяет естественнонаучное исследование (биологическое, физическое, химическое), математический анализ и инженерный подход к проблеме. Чтобы не искажать терминологию автора, термин «наука-перекресток» оставлен без изменения. — *Здесь и далее примечания редактора.*

ток песен насекомых (впрочем, и это еще слишком широкая область — обычно речь идет только об одном семействе насекомых); третий может часами обсуждать сложнейший состав какого-нибудь единственного в своем роде химического вещества.

И, пожалуй, без особого преувеличения можно сказать, что удел специалистов будущего — знать все ни о чем. Пока мы еще не дошли до такой крайности, но и сейчас узкоспециализированные знания в отрыве от других областей вряд ли могут принести человечеству прямую пользу. Необходимо найти способ широкого распространения этих знаний, чтобы затем объединить их на единой научной основе — непременное условие для того, чтобы они приносили пользу людям. Но как реализовать это насущно необходимое объединение?

Теперь все реже и реже встречаются так называемые широко образованные люди. Человек, который хочет знать что-нибудь обо всем, неизбежно приобретает только общие, весьма поверхностные знания. Перед нами две крайности: либо это специалист, который знает все об очень немногом, либо это образованный человек, который обо всем знает очень немного.

Решение этой труднейшей дилеммы надо искать где-то посредине между двумя одинаково неприемлемыми крайностями. К счастью, такой выход уже намечается. Лучших специалистов беспокоит их чересчур узкая специализация, они задыхаются в своих тесных изолированных отсеках. Разве не все в природе взаимосвязано? Но число новых наук растет с такой головокружительной быстротой, что ни один мозг не может охватить всего разом. Настоящий прогресс возможен только при умении обобщать все явления, смотреть на мир как на единое целое. Изобретать — это и значит сопоставлять явления, которые никогда не соприкасались; но прежде чем сравнивать и сопоставлять эти явления, их надо изучить. Почему бы не объединить специалистов разных профилей и не создать условия для плодотворного обмена мнениями? Тогда вместо одного индивидуального мозга возникнет как бы коллективный мозг, объединяющий знания отдельных специалистов.

Вместе с тем совершенно очевидно, что изобретателю нет никакой необходимости знать все. Вряд ли стоит ожидать великих открытий от объединенных усилий специалиста по ферросплавам и знатока песен насекомых. А вот содружество такого знатока со специалистом по машинному переводу может принести явную пользу: ведь оба занимаются проблемой анализа языков. Но путь от замысла до его реализации, как всегда, нелегок. Недостаточно осознать необходимость связей между разными отраслями наук, — эти связи нужно осуществить на деле. Нужно, чтобы специалисты, пришедшие из разных областей, научились понимать друг друга, нашли общий язык. Иначе все усилия будут затрачены впустую и никакой пользы такое сотрудничество не принесет. А специалистам из разных областей науки понять друг друга не так-то легко.

Биологи, например, пользуются совершенно иной терминологией, чем физики, и у них совсем другая научная методика. Значит, прежде чем совместная работа даст какие-то результаты, нужно провести большую предварительную подготовку, установить полное взаимопонимание. Для этого есть только один путь: необходимо, чтобы ученые поставили перед собой общие задачи, определили круг своих интересов, очертили, так сказать, границы своих владений. Такой круг задач, установленный по общему соглашению, и станет предметом новой науки, которая получила название междисциплинарной науки, или науки-перекрестка.

Возникновение наук-перекрестков знаменательно для второй половины XX века и чрезвычайно важно для будущего всей науки в целом. Только в рамках таких наук может происходить воссоединение, необходимое для прогресса. Столкновение разных точек зрения, на первый взгляд противоречащих друг другу, но совпадающих по сути, может зажечь фейерверк новых идей. Одни замыслы, возникшие при этом, окажутся бесплодными, но зато другие принесут богатейшие плоды и докажут на деле пользу такого сотрудничества.

Взаимоотношения между отдельными дисциплинами и науками-перекрестками можно показать на

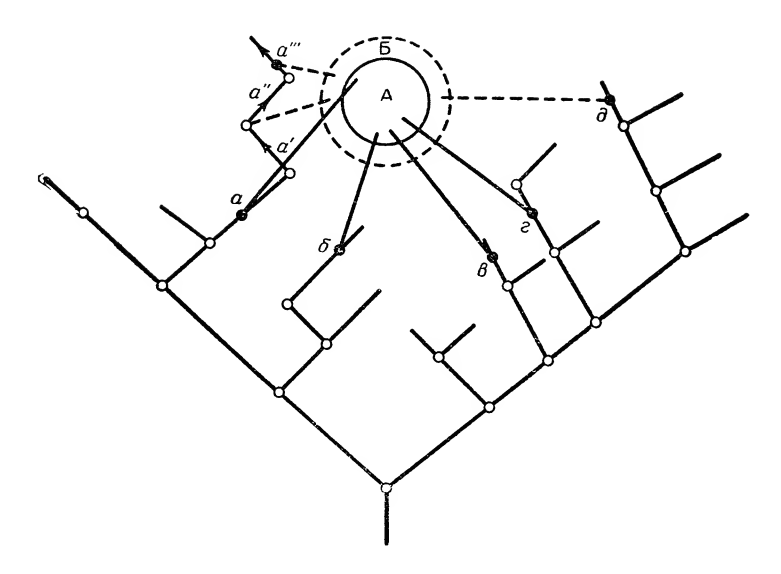


Рис. 1. Специальные науки и науки-перекрестки.

а, б, в, г, д — специальные науки; *А* — наука-перекресток; *а — а' — а'' — а'''* — развитие в направлении большей специализации; *Б* — развитие науки-перекрестка.

схеме (рис. 1). К первым относятся науки аналитические. Каждая из них представляет собой сумму фактических знаний. В отличие от них науки-перекрестки — это науки синтетические, представляющие собой сочетания идей. В то время как отдельные дисциплины развиваются в направлении все большей специализации (через *а*, *а'*, *а''*, *а'''*), наука-перекресток расширяет поле своего действия за счет захвата и сопоставления новых областей, относящихся к разным дисциплинам (переход от *А* к *Б*).

Для ученых XIX века такой подход был бы просто немыслим. В частности, науки о живых организмах никак не соприкасались с науками о неживой природе. А разве живые организмы не похожи на удивительные машины особого рода, на тонкие, точные механизмы? Разве не интересно было бы объединить под знаком одной науки биологов и инженеров и вместе обсудить эти вопросы? Это и составляет задачу новой науки, которая называется бионикой.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ БИОНИКИ

Сходство слов «бионика» и «биология» сразу наводит на мысль о живых существах.

В одном отношении бионика выгодно отличается от многих других наук, время зарождения которых установить трудно или невозможно. Ее официальное появление на свет произошло в конце лета 1960 года и сопровождалось соответствующими церемониями. Семьсот ученых — биологи, инженеры, математики, физики и физиологи — были приглашены Военно-воздушным ведомством США на конгресс, который проходил 13, 14 и 15 сентября в Дейтоне, штат Огайо. Тридцать ораторов представляли бионику, и отчет о торжестве составил внушительный том в 500 страниц. Для большей точности заметим, что о бионике заговорили несколько раньше, на двенадцатой ежегодной конференции по аэронавигационной радиоэлектронике в мае 1960 года. На одном из заседаний под председательством доктора Джона Кито были заслушаны четыре доклада по бионике, в том числе и доклад Стила. Это заседание было посвящено программе исследований в центре Райт-Паттерсон (ВВС США), относящихся к области бионики. Чтобы быть абсолютно точными, надо сказать, что слово «бионика» предложил исследователям в августе 1958 года Джек Стил. По его собственным словам, организационная работа и некоторые бионические исследования начались за несколько лет до того, как родилось это название. Оно появилось тогда, когда уже стало ясно, что возникла новая наука, которой пора дать имя.

Автор дал четкое определение бионики *: это наука о системах, функции которых копируют функции живых систем, о системах, которым присущи специфические характеристики природных систем или которые являются их аналогами. Это грандиозная программа, и ее, конечно, нужно растолковать и объяснить на

---

* Заслуживает внимания определение бионики, предложенное Г. С. Гудожником в брошюре «Место бионики в системе наук», общ-во «Знание», РСФСР, М., 1966.

конкретных примерах. Хотя нам еще не совсем ясно, насколько широкое поле действия захватывает новая наука, уже сейчас каждый чувствует, что бионика может быть только динамической наукой, как электроника или ядерная физика, и должна занять не менее важное место в нашем стремительно развивающемся мире. Поначалу бионика занимали в основном практические вопросы — возможность конструировать машины по живым моделям. Отсюда более узкое определение бионики — это использование знаний о живых системах для разрешения тех или иных технических проблем.

Если исходить из этого определения, то нельзя отрицать, что бионика стара как мир и что ею, сами того не зная, занимались многие ученые и механики. Во все времена именно из окружающей природы человек черпал идеи и замыслы своих изобретений. Тысячи лет человек мечтал летать, как птица, и это вдохновляло его на создание бесчисленных проектов летательных аппаратов. Самый известный пример — Леонардо да Винчи. В тетради, датированной 1505 годом, этот универсальный гений, великий художник, замечательный инженер, гидравлик и механик сделал записи о летучей мыши. Именно летучая мышь, говорит он, должна служить образцом летательной машины, ибо у нее кожная перепонка покрывает и укрепляет арматуру, являющуюся основой крыла, в то время как покрытые перьями крылья птиц, сквозь которые проникает воздух, должны опираться на прочные кости и сильные мышцы. А у летучей мыши кожная перепонка, объединяющая все крыло, непроницаема для воздуха. Удивительно сходство чертежа летательной машины Леонардо да Винчи (рис. 2) с обликом летучей лисицы, крупного представителя рукокрылых, сильного летуна. Построил ли гениальный мастер эту машину, от которой остались только чертежи? Этого никто не знает. Ему не хватало одной существенной детали — двигателя, достаточно легкого и мощного, чтобы приводить в движение крылья; в его распоряжении была только мышечная сила человека, заведомо непригодная для этой цели. Примерно через 400 лет появился первый летательный аппарат, и сконструирован он был все

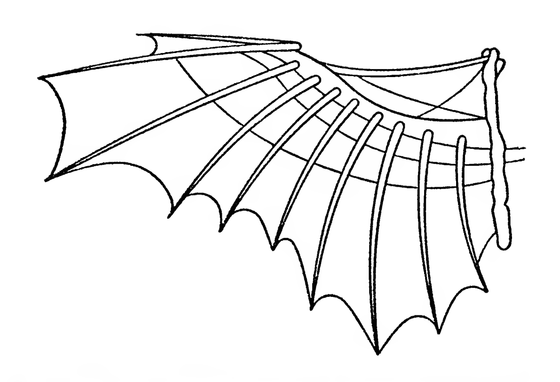


Рис. 2. Эскиз летающей машины Леонардо да Винчи и фотоснимок крупной летучей мыши.

на том же принципе строения крыла летучей мыши. Это был «Эол» Клемана Адера. Конструктор тщательно измерил скелет летучей мыши и воспроизвел его в увеличенном виде, используя склеенные и связанные бамбуковые планки. Этот каркас он обтянул тонким шелком, имитирующим кожаную перепонку летучей мыши. Но у Клемана Адера было то, чего недоставало его предшественнику, — достаточно сильный двигатель. Конечно, это был не современный ракетный двигатель, а всего-навсего паровой мотор, сверхлегкий для своего времени: он давал одну треть лошадиной силы на каждый килограмм собственного веса. Не пытаясь привести в движение крылья, Адер использовал пропеллеры. О том, насколько далеко можно зайти в копировании, говорит одна деталь: пропеллеры были сделаны из настоящих птичьих перьев. В октябре 1890 года конструктор совершил на своей машине перелет в 50 метров. Впоследствии он разорился, конструируя более мощную летающую машину — «Авион». Эта машина хранится в Париже, в Музее искусств и ремесел. Потрясает ее несомненное сходство с живым прототипом.

Вы скажете, что если человек всегда мечтал летать, как птица, и если в 1890 году еще казалось возможным точно копировать крылья летучей мыши, то в наше время такие методы, должно быть, давно устарели? Трудно понять, каким образом наблюдения зоологов помогут инженеру создать проект современного сверхзвукового самолета. Совершенно верно. Но это всего-навсего значит, что бионика не внесет ничего нового в эту частную область. К счастью, бионика располагает богатейшими возможностями, и во многих областях она может послужить толчком для развития творческих идей, подобно чудодейственному ферменту в живом организме.

Однако почти прямое копирование природы оправдывает себя и в наши дни. Приведем один пример. Дельфин движется в воде с огромной скоростью как будто без видимых мышечных усилий. Это объясняется тем, что вода перемещается вдоль тела дельфина совершенно равномерно и отдельные ее слои остаются параллельными друг другу. А у любого судна при быстром движении вокруг корпуса образуются завихре-

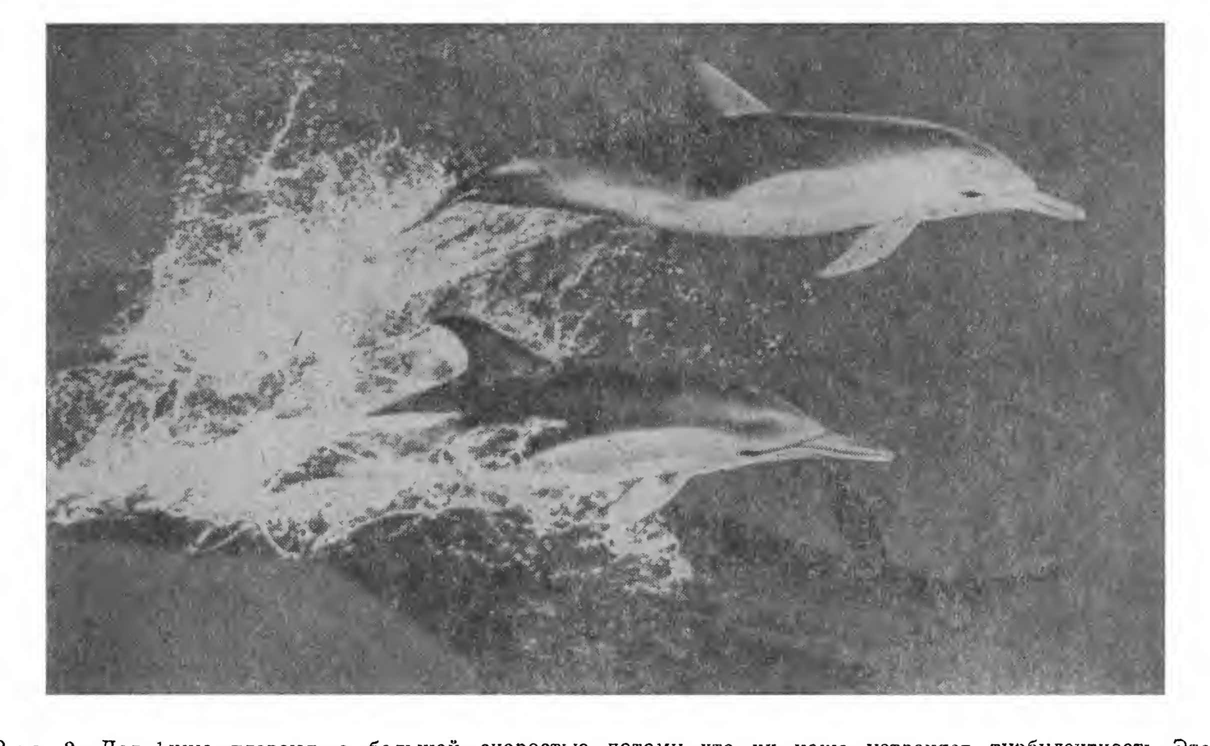


Рис. 3. Дельфины плавают с большой скоростью, потому что их кожа устраняет турбулентность. Это свойство используется в покрытиях корпусов подводных лодок, созданных по образцу кожи дельфина.

ния, нормальное течение воды нарушается, оно становится завихренным, или турбулентным. В результате возникает сопротивление, снижающее скорость судна. Секрет дельфина заключается в том, что его кожа состоит из двух слоев: наружного, тонкого и очень эластичного, и внутреннего, более толстого, состоящего из трубочек, заполненных губчатым веществом. Завихрения всегда сопровождаются повышением давления. Когда вокруг тела быстро плывущего дельфина образуется турбулентное течение, наружный эластичный слой кожи передает давление на внутренний. Этот упругий слой служит как бы амортизатором, и зарождающиеся завихрения не успевают развиться. Уже сделаны искусственные покрытия, копирующие кожу дельфина; подводные лодки с таким покрытием при прежней мощности моторов могут достигать более высоких скоростей — вот пример практического приложения бионики (хотя он имел место до ее официального утверждения). Но это только частный случай, он далеко не исчерпывает возможности бионики.

Разумеется, прямым копированием природы не следует пренебрегать: ведь живые существа на Земле эволюционировали два миллиарда лет; в течение всего этого времени естественный отбор безжалостно отбрасывал всех, кто не мог приспособиться к условиям существования. При конструировании машин, предназначенных для работы в тех же условиях, в каких существуют живые организмы, можно опираться на результаты этих бесчисленных экспериментов природы. Самое простое в таком случае — наиболее точное копирование природных моделей, например кожи дельфина. Но все это имеет отношение только к первой части определения бионики, как науки о системах, функции которых копируют функции природных живых систем. Не надо забывать и две другие части определения: это наука о системах, которые повторяют специфические характеристики природных систем, наука о системах, аналогичных природным системам. Итак, эволюция представила нам системы, которые стоит копировать, но методы, использованные самим процессом эволюции, тоже

необходимо изучать. Это изучение может принести много пользы, и прежде всего оно позволяет вывести одно общее правило: слишком хорошая адаптация к окружающей среде может оказаться столь же губительной, как и недостаточная приспособленность.

На каждом этапе, при каждом значительном изменении среды обитания жизнь делала шаг вперед, подвергая пересмотру прежние решения, которые раньше казались безупречными и процветали достаточно долго. А не окажется ли то, что было благотворно для живых систем, полезным и для аналогичных искусственных систем? Постоянная переоценка существующих методов и концепций должна быть золотым правилом для всех биоников. Подходя к решению той или иной проблемы, всегда стоит спросить себя, нужно ли следовать по прежнему пути и не лучше ли вернуться к истокам и попытаться обойти препятствия, вместо того чтобы тратить силы на их преодоление.

К тому же точно скопировать природную модель трудно, а подчас и невозможно. Хотя Клеман Адер откровенно скопировал свою летающую машину с летучей мыши, она вовсе не была ее точной копией. Этот конструктор, человек большого и оригинального ума, долго изучал полет птиц, прежде чем взялся своими руками и на собственные деньги сооружать летательный аппарат. Он понимал, что не стоит и думать о машущих крыльях, потому что такие попытки уже делались до него и всегда безуспешно. Он знал, что переход от размеров летучей мыши с полуметровым размахом крыльев к машине с размахом крыльев 14 метров потребует другого двигателя, и поэтому вместо машущих крыльев поставил пропеллеры. Бионика должна взять за основу этот подход — не копировать прототип в деталях, но сначала понять принцип действия, а затем применить его в конструкции. Только при таком подходе моделирование будет плодотворным и послужит дальнейшему прогрессу.

Теперь нам стало немного понятнее, что такое бионика. Но это пока только поверхностное знакомство. Попробуем немного углубить наши знания. Как обычно поступают в таком случае? Просто сравнивают





Рис. 4. Птицы и самолеты подчиняются одним и тем же законам аэродинамики, но искусственно воспроизвести многообразные движения крыльев птиц (слева) очень трудно. Огромные крылья стервятника (справа вверху) позволяют ему парить, почти не теряя скорости. Просветы между перьями на концах крыльев снижают турбулентность; такие прорези иногда применяются в самолетостроении. Так как подъемная сила прямо пропорциональна площади крыла и квадрату скорости, птицы с быстрым полетом, как, например, стриж (внизу справа) или ласточка (внизу слева) имеют короткие перья, но большой размах крыльев позволяет им парить в воздухе, не падая вниз.

данную область с близкими ей областями науки и определяют, в чем их сходство и различие. В той области, где естественные науки сходятся с инженерно-техническими науками, бионика не единственная наука-перекресток. Еще раньше появилась кибернетика. Эта наука уже широко известна, и многочисленные труды по кибернетике дадут нам богатый материал для сравнения.

БИОНИКА И КИБЕРНЕТИКА

Происхождение кибернетики известно так же точно, как и происхождение бионики. В 1949 году появилась книга, которая называлась гак: «Кибернетика, или управление и связь в животном и в машине». Ее автором был Норберт Винер, профессор Массачусетского технологического института, талантливый ученый (он получил степень доктора наук в Гарвардском университете, когда ему было всего восемнадцать!), математик и философ, к тому же удивительный полиглот, владеющий четырнадцатью языками. Во время второй мировой войны профессор Винер занимался вопросом автоматической наводки зенитных орудий. Тогда уже появились первые следящие радарные установки, которые точно определяли положение и постоянно измеряли скорость самолета, попавшего в луч радара. Известно, что орудие наводят не на самолет, а на точку впереди него. Действительно, выпущенному снаряду нужно какое-то время, чтобы долететь до цели, а за это время самолет успеет переместиться. Значит, положение точки прицела является функцией длины траектории снаряда, а длина траектории в свою очередь зависит от положения точки прицела. Разбирая эту функциональную зависимость, мы оказываемся перед задачей, где неизвестное — длина траектории — является функцией самого себя. Винер нашел элегантное решение и создал вычислительную машину, так сказать, замкнутую на саму себя: часть сигнала, полученного на выходе, снова передавалась на вход машины. Это была так называемая система замкнутой петли, или петли обратной связи. Благодаря такой обратной связи машина

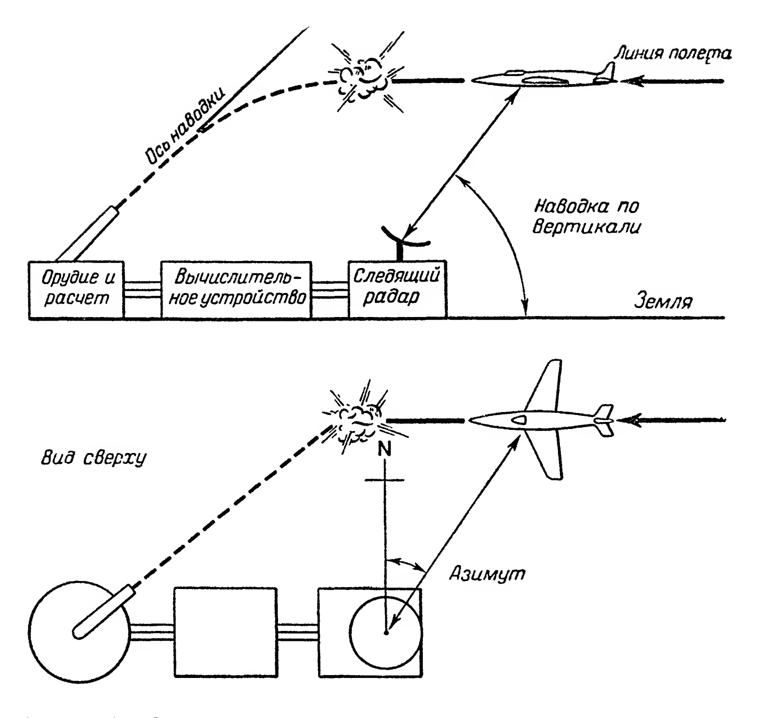


Рис. 5. Схема автоматической системы наводки зенитного орудия.

самостоятельно находила точное время движения снаряда и правильно вычисляла положение точки прицела.

Профессор Винер заметил, что и в живой природе можно найти системы с аналогичными функциями, то есть органы, где часть выходного сигнала снова подается на вход. Еще в 1942 году он обсудил этот вопрос с биологом Артуро Розенблютом, и они пришли к мысли сравнить процессы управления в машинах и в живых организмах. Как ведет себя живое существо по отношению к окружающей его среде? Каждый момент оно получает поток информации в форме ощущений. Эта информация от органов чувств передается в мозг. Мозг, обрабатывая поток информации,

воспринимает определенное ощущение, узнает его, выбирает подходящее поведение, определяет нужное действие по отношению к внешней среде и дает двигательным органам соответствующий сигнал. Совершенно ясно, что каждое такое действие влечет за собой и более обобщенную реакцию, изменяя поведение в целом.

Заслуга профессора Винера в том, что он уловил все неисчерпаемые возможности применения подобной аналогии, которая стала основой кибернетики. От формальной аналогии он пришел к уподоблению свойств: изучение функций машины объясняет функции живых существ. Таким образом, кибернетика и бионика предстают перед нами как две стороны одного взгляда на вещи: бионика изучает и реализует механические системы, используя принцип действия живых организмов, а кибернетика изучает живые организмы по аналогии с машинами. В дальнейшем мы еще не раз уточним и углубим понимание этого самого существенного сходства бионики и кибернетики, хотя каждая из этих наук сохраняет свои отличительные черты и свою специфику.

Итак, мы рассмотрели некоторые определения, которые помогут нам лучше понять, что такое бионика. Чтобы продвинуться дальше, логично было бы спросить у самих бионикоз, что они думают или, скорее, что они делают. Но тут нужна осторожность: нельзя говорить о бионических исследованиях как таковых — речь идет о смешанных группах, где биологи и инженеры объединяются под знаком бионики. Бионика вряд ли составит предмет курса, который читают в университетах. Да и учебник по этому курсу трудно себе представить.

В настоящее время деятельность биоников протекает главным образом в форме конгрессов, коллоквиумов, симпозиумов. Обмен идеями становится основой для лабораторных работ. Короче говоря, инженер-бионик и биолог-бионик в своей ежедневной работе — только инженер и только биолог, а как бионики они встречаются на конгрессе, чтобы обсудить вместе нужные вопросы. Основные принципы бионики создаются именно на этих съездах и публикуются в отчетах.

За первым конгрессом в 1960 году последовал второй, проведенный в Корнеллском университете (с 30 августа по 1 сентября 1961 года), затем — третий, состоявшийся, как и первый, в Дейтоне в марте 1963 года.

В июле 1963 года в Афинах был организован конгресс на чисто бионическую тему: «Искусственные и естественные органы обработки информации». В декабре 1965 года та же группа снова организовала в Париже и в Дюссельдорфе сессии по общим вопросам бионики. Сообщения, имеющие отношение к бионике, начинают все чаще появляться в научных обозрениях по биологии, зоологии и электронике, выходящих в США, СССР и других странах Европы. Четвертый общий симпозиум по бионике проходил на базе Райт-Паттерсон (ВВС США) с 3 по 5 мая 1966 года. Нужно также упомянуть коллоквиум по бионическим моделям сонаров животных, проходивший в Италии с 26 сентября по 3 декабря 1966 года. На этом коллоквиуме была продемонстрирована особая, в полном смысле бионическая форма работы — тройственные дискуссии биологов, инженеров и математиков. Эта интересная работа дала возможность определить все то новое, что принесла с собой бионика. В следующих главах мы постараемся рассказать об этом и разобрать несколько основных примеров, иллюстрирующих главные темы, над которыми работают бионики. Но сначала — последнее замечание.

Современная цивилизация началась промышленной революцией XVIII—XIX веков, тогда же началась и погоня за новыми видами энергии. Но в настоящее время человек понял, что первостепенное значение имеет информация. Кибернетика совершенно ясно показала, что необходимо научиться быстрее и лучше обрабатывать неуклонно растущий поток информации.

Этим и объясняется разработка множества автоматических устройств, обрабатывающих информацию, в частности гигантских электронных вычислительных машин. Бионика может многое сделать в этой области, потому что человеческий мозг — удивительно совершенный прибор для обработки информации: он потребляет небольшую мощность, обладает высокой на-

дежностью и почти неограниченной емкостью памяти. Но недостаточно уметь обрабатывать информацию, нужно еще получить ее в той форме, которая годится для введения в машину. Именно здесь бионике и предстоит показать все свои возможности, потому что живые существа не только умеют обрабатывать информацию, но и прежде всего обладают замечательной способностью получать только нужную информацию путем отбора, отсеивая ненужные сигналы и случайные помехи.

ГЛАВА 2

ИЗМЕРЕНИЕ И КОДИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ

ЧТО ТАКОЕ ИНФОРМАЦИЯ

Когда речь идет о бионике, вопросы получения и обработки информации приобретают первостепенное значение. Вся важность этого утверждения станет ясна дальше, когда мы разберем отдельные темы, относящиеся к теории и практике бионики. А пока что вопросы информации послужат нам просто удобной точкой отправления.

Итак, что же такое информация? Разумеется, у каждого есть свой ответ на этот вопрос. Широкая пресса нас информирует, радио передает сводки информационных агентств, телефон позволяет собеседникам что-то сообщить друг другу. Подобных примеров великое множество. Но наука требует точных и ясных определений. Еще одно условие: это определение должно иметь количественное выражение, или, проще говоря, чтобы из философского понятия превратиться в научное определение, информация должна получить численное выражение. Из приведенных выше примеров можно сделать общее заключение: информация передается посредством сообщений в письменной, печатной или устной форме. Для того чтобы получить информацию, необходимо, конечно, принять эти сообщения. Но прежде всего их нужно понять. Понимание включает в себя две последовательные фазы: сначала анализ структуры полученного сообщения, затем раскрытие смысла, заключенного в этой структуре. Для этого полученное сообщение сравнивается в мозгу с уже имеющимися готовыми схемами. Некоторые из них отбираются, сопоставляются с полученным сообщением и комбинируются в интеллектуальном синтезе. Этот процесс позволяет понять смысл сообщения, принять информацию, которая в нем содержится. Все эти последовательные действия носят часто неосознанный характер. Разумеется, получить сообщение еще недостаточно, чтобы понять

его. Возьмем, например, шифрованный текст. На первый взгляд это просто лишенный смысла набор знаков. Чтобы понять смысл, скрытый за бессмысленным набором слов, нужно знать код.

Что же такое код? Это некое принятое между корреспондентами условие, в котором одни буквы соответствуют другим буквам, одно слово заменяется другим. Чтобы дешифровать текст и понять его смысл, нужен ряд последовательных действий: получить сообщение (прочесть или услышать), разобрать его структуру (составляющие его слова), сравнить элементы этой структуры с имеющимися готовыми схемами (кодом) и, наконец, понять и выразить смысл сообщения на общепринятом языке. В сущности те же самые процессы дешифровки закодированного текста происходят и при получении сообщения на общепонятном, повседневном языке. Просто мы так привыкли к этому, что не замечаем самого процесса дешифровки, пока не встретим незнакомое слово, значение которого приходится искать в словаре, или еще какое-нибудь непредвиденное затруднение.

Полная теория информации должна включать все эти аспекты: структуру сообщения и его кодирование, передачу, декодирование и, наконец, постижение смысла. Это настолько обширная программа, что, если взяться за все сразу, можно запутаться. В подобных случаях лучше брать каждый пункт отдельно и не торопиться переходить от одного вопроса к другому.

Первый этап — разбор структуры сообщения. Нам кажется, что специально зашифрованный текст не содержит никакой информации, потому что структура его лишена всякой логики, связь между словами непонятна и сами слова неузнаваемы. Все здесь как-будто случайно. А информация и случайность находятся в таком же естественном противоречии, как день и ночь. Если сообщение несет информацию, то его структура представляет собой заведомо неслучайный набор элементов (слов). Значит, чем богаче информацией структура, тем она сложнее, тем меньше в ней случайных элементов. Или, иначе, чем сложнее структура, чем меньше вероятность ее случайного составления, тем богаче она информацией. Следовательно, чем больше наша исходная неосведомленность, тем

сложнее должно быть сообщение, которое ее устранит. Если сообщение недостаточно сложно, то останется заметное количество неосведомленности. Можно попытаться определить степень сложности структуры — то, что называется количеством информации, которое она содержит, — как разницу между исходной неосведомленностью (до получения сообщения) и конечной неосведомленностью (после получения сообщения). Символически это можно выразить так:

Количество информации = Исходная неосведомленность — Конечная неосведомленность

Первый шаг к количественному определению информации уже сделан, хотя поначалу и кажется, что мы еще ничего не достигли. Действительно, определяя количество информации как разность между двумя неосведомленностями, мы как будто просто перефразируем вопрос, не приближаясь к ответу. Это не совсем так. Ведь мы тем самым показываем, что количество информации имеет числовое значение, а значит, с ним можно производить арифметические действия. Вообразим себе совсем простую ситуацию, когда информация получена либо одновременно, либо в два приема. Если вся информация получена в один прием, то есть сразу в полном объеме, то это условие совпадает с нашим символическим уравнением, и количество информации будет равно разности между исходной неосведомленностью и конечной неосведомленностью. Если же информация получена в два приема, то сначала мы имеем промежуточную информацию, равную разности между исходной неосведомленностью и промежуточной неосведомленностью. И только второй прием принесет нам конечную информацию. Опираясь на приведенное выше определение, можно сказать, что эта конечная информация равна разности между неосведомленностью, которую мы назвали промежуточной, и конечной неосведомленностью. Подведем итог всем этим рассуждениям в виде трех символических уравнений:

а) если информация получена в один прием, глобально:

Глобальная информация = Исходная неосведомленность — Конечная неосведомленность;

б) если информация получена в два приема:

Исходная информация = Исходная неосведомленность — — Промежуточная неосведомленность;

Конечная информация = Промежуточная неосведомленность — — Конечная неосведомленность.

Эти символические уравнения имеют количественное значение. Их можно складывать в обычном порядке. Если сложить два уравнения, которые характеризуют второй случай, то два выражения, относящиеся к промежуточной неосведомленности, взаимно уничтожаются. Следовательно, глобальная информация представляет собой сумму двух частных информаций: исходной и конечной. Определенное таким образом количество информации (оно зависит, как мы помним, от сложности сообщения) действительно имеет численное выражение и может быть подвергнуто операциям сложения и вычитания.

ЕДИНИЦЫ ИНФОРМАЦИИ

Итак, мы получили интересные результаты. Пойдем дальше. Всякий знает, что для решения сложной задачи нужно постараться разложить ее на ряд более простых задач и решить их одну за другой. Чтобы выразить в цифрах количество информации, которое содержится в сложной структуре, следует разложить эту структуру на более простые элементы, рассчитать информацию, которую несет каждый такой элемент, и затем суммировать результаты.

Не стоит сразу браться за трудные задачи — лучше начать с изучения более простых систем, а затем обобщить результаты и применить их к более сложным случаям. Информация почти всегда является ответом на вопрос. Если возник вопрос, это значит, что известно некоторое количество возможных ответов, но для выбора правильного ответа не хватает данных. Естественно, чем больше количество вероятных ответов, тем больше неопределенность. Вообразим себе простейшую возможную ситуацию: выбор ограничен двумя возможностями и вероятность получения каждого из этих ответов одинакова; такие ответы назы-

ваются равновероятными. На вопрос «Родится мальчик?» практически одинаково вероятны два ответа: «Да, мальчик» или «Нет, девочка». Когда получен ответ, исходная неосведомленность сводится к нулю. Количество информации в данном случае численно равно исходной неосведомленности. Эта исходная неосведомленность — наименьшая из всех возможных, потому что нет ничего проще, чем сделать выбор между двумя равновероятными ответами! Поэтому разумно принять за единицу информации количество информации, полученное в случае выбора одной из двух возможностей, вероятность появления которых одинакова. Такая единица информации получила название *бит*.

Мы начали с самой простой ситуации, а теперь обратимся к более сложным задачам. Разберем случай, когда на вопрос можно дать не два ответа — просто «да» или «нет», — а целых четыре. Почему четыре, а не три? Как мы увидим дальше, от двух ответов к четырем перейти легче, чем к трем. Предположим, что нужно сделать выбор между четырьмя первыми цифрами: 1, 2, 3 и 4. Какое количество информации (в битах) потребуется для того, чтобы сообщить о сделанном выборе? Отметим заранее, что нет никаких оснований предпочитать одну цифру другим — все возможные ответы равновероятны. Чтобы узнать правильный ответ, нужно задавать вопросы. Проще всего спросить: «Какую цифру вы задумали?» и получить ответ: «Три».

Обычно спрашивают именно так. Но для того чтобы выразить соответствующее количество информации в битах, придется вспомнить определение бита и ограничиться вопросами, на которые можно ответить только «да» или «нет». Точнее, каждый такой вопрос рассчитан на получение ровно одного бита информации. Так как количество информации можно суммировать, когда она получается в несколько последовательных приемов, то полная информация в битах будет соответствовать количеству вопросов, заданных для полного выяснения главного вопроса. Таким образом, первый вопрос можно сформулировать так: «Это цифра 1?» Ответ простой — «да» или «нет». Но этим вопросом мы разделили все возможные ответы на две неравные части: с одной стороны, цифра 1,

с другой — три остальные цифры, то есть 2, 3 и 4. Значит, вопрос поставлен неудачно: для того чтобы получить один бит информации в ответ на каждый вопрос, нужно разделить все возможные ответы на две строго равные части, а в рассмотренном нами случае части не равны. Например, чтобы в одной группе содержались цифры 1 и 2, а в другой 3 и 4, следует задать такой вопрос: «Задуманная цифра больше двух?» Предположим, что была задумана цифра 3. Нам ответят: «Да». Второй вопрос: «Это тройка?» — и мы получаем правильный ответ. Две последовательные возможности выбора — значит, два бита информации. Легко заметить, что, используя такой метод, мы узнаем задуманную цифру при помощи двух вопросов. Если, например, задумана единица, на первый вопрос мы получим ответ: «Нет». Тогда ответ на второй вопрос: «Это цифра 1?» позволяет узнать задуманное число.

Сформулировать вопросы можно несколько иначе, например начать с вопроса: «Задуманное число — четное?» И в этом случае все возможности делятся на две равные группы: 1 и 3, с одной стороны, 2 и 4 — с другой. Самое главное, чтобы поставленный вопрос делил возможные ответы на две равные части, чтобы каждый ответ нес ровно один бит информации.

Если предстоит выбор не из четырех, а из восьми первых цифр — 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8, — повторится тот же процесс. Первый вопрос: «Задуманная цифра больше четырех?» сводит количество возможных ответов от восьми к четырем, то есть к предыдущему случаю. При помощи трех вопросов мы точно узнаем выбранную цифру; таким образом, полученная информация равна трем битам. Теперь уже нетрудно понять, что выбор из 16 возможностей потребует четырех битов информации, из 32 — пяти и т. д. Если поместить в одной строчке количество битов информации, а в другой — возможности выбора, соответствующие этим цифрам (учитывая, что один бит информации соответствует выбору одной из двух возможностей), мы получим следующие цифры:

Количество информации (в битах):	1	2	3	4	5	6	7
Число возможностей выбора:	2	4	8	16	32	64	128

Теперь мы видим, почему выбор из трех возможностей сложнее, чем из четырех: здесь не получается целого числа битов; поэтому мы и перешли прямо от 2 к 4, от одного бита к двум. Внимательно рассматривая выведенный нами ряд чисел, мы сразу замечаем, что при незначительном увеличении количества информации сложность рассматриваемых ситуаций резко возрастает. Можно более точно описать это соотношение, если вспомнить несколько элементарных понятий из школьной математики. В первом ряду чисел каждая цифра получается путем прибавления единицы к предыдущей цифре — это так называемая арифметическая прогрессия. Во втором ряду каждая последующая цифра вдвое больше предыдущей — это геометрическая прогрессия. Число возможностей, представленных для выбора, и количество информации, которое содержится в окончательном ответе, относятся друг к другу как геометрическая прогрессия к арифметической. Математики такое соотношение называют логарифмической зависимостью. Следовательно, количество информации, содержащееся в окончательном ответе при выборе из нескольких равновероятных возможностей, равно логарифму по основанию 2 от числа возможностей. Если имеется только одна возможность, отсутствует и неопределенность: количество необходимой информации равно нулю, так как логарифм единицы всегда равен нулю.

Но большей частью приходится решать более сложные задачи, когда объекты или ситуации, между которыми нужно сделать выбор, подразделяются на несколько категорий. В самом простом случае к каждой категории относится одинаковое число (N) объектов. Если число различных категорий равно n, то общее число возможностей выбора можно определить заранее: оно будет равно произведению количества объектов в каждой категории на общее число категорий (nN). Количество информации, соответствующее правильному ответу, равно логарифму этого произведения, то есть $\log nN$. Но информацию о выборе можно получить и в несколько приемов: сначала определить категорию, в которой содержится выбранный объект, а затем уже внутри этой категории определить нужную ситуацию. На первой стадии ответ

содержит количество информации, равное log n битам, на второй стадии — log N битам. А так как логарифм произведения равен сумме логарифмов сомножителей, то общее количество информации равно сумме последовательно полученных количеств информации.

Понятие количества информации так существенно, что оправдывает столь длинные рассуждения. Наиболее важный вывод, к которому приводят эти рассуждения, заключается в том, что небольшое увеличение количества информации, необходимой для определения сложной ситуации, соответствует значительному возрастанию сложности самой ситуации; математически это выражается логарифмической зависимостью между этими двумя факторами.

До сих пор мы считали, что нет никаких причин, которые заставляли бы априори выделять одну ситуацию, предпочитая ее другим. Но даже в этом случае количество информации сохранит логарифмическую зависимость от числа возможностей выбора, хотя формулы, конечно, станут несколько сложнее. Приводить их здесь нет необходимости, достаточно запомнить общий вывод: чтобы точно узнать о выборе ситуации, требуется больше информации в том случае, если это равновероятные ситуации, чем в случае, когда они не равновероятны. Здравый смысл подтверждает этот вывод: наибольшее количество информации требуется для анализа ситуации, целиком подчиненной игре случая.

А что происходит, если ситуация становится чрезвычайно, даже бесконечно сложной? Как раз такой случай мы наблюдаем, когда информация передается посредством некоторой физической величины, которая постоянно меняется, такой, например, как напряжение тока в сети. Высокочувствительный измерительный прибор может, по-видимому, фиксировать малейшие и даже бесконечно малые изменения напряжения. Но должна ли сама информация быть бесконечной, чтобы сообщить исчерпывающие сведения о соответствующей ситуации? Безусловно, нет. И причина здесь в том, что практически невозможно различить две величины, чрезвычайно близкие друг к другу. Это нельзя сделать чисто физически из-за постоянного присутствия универсального фактора, который называется шумом,

Каждому из нас неоднократно приходилось сталкиваться со следующим явлением: если повернуть регулятор приемника до самого тихого звука, слышно, что динамик работает, но нельзя уловить содержания передачи. Этот звук, похожий на потрескивание или шорох, и есть шум. Если передача принимается издалека, этот шум отчетливо слышен и мешает слушать речь или музыку. Нередко на экране телевизора на изображение накладывается нечто похожее на снежную метель — это еще один пример шума. Если в жаркий день посмотреть на горизонт, то можно увидеть,

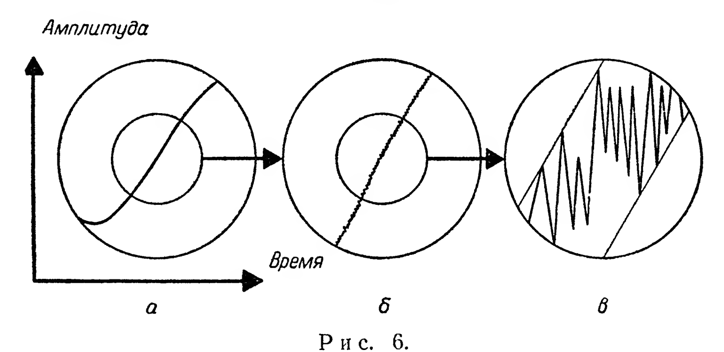


Рис. 6.

а — запись электрического сигнала переменной амплитуды; *б* — увеличение центральной части; *в* — дальнейшее увеличение показывает границы шума, в пределах которых сигнал неразличим. Обратите внимание на беспорядочный характер шума.

как очертания предметов словно плывут или дышат: это тот же шум, который в данном случае происходит от турбулентного движения воздуха над нагретой землей. Причины, которые могут вызвать явления, называемые шумом, весьма разнообразны. И как бы с ними ни боролись, их можно только уменьшить. Совершенно избавиться от шума нельзя: для этого пришлось бы снизить температуру среды до абсолютного нуля, а это, как известно, невозможно.

Наличие шума мешает математически точно определить изменяющийся сигнал. Попробуем измерить, например, электрическое напряжение в телефонной сети во время разговора (рис. 6, *а*). Если увеличить небольшой участок кривой, линия станет более размытой (рис. 6, *б*); при еще большем увеличении уже видна структура шума (рис. 6, *в*). Шум не может нести

информацию, так как все его изменения совершенно случайны.

Представим себе, что вместо постепенно меняющегося сигнала мы наблюдаем сигнал, меняющийся дискретно, подобно ступенькам лестницы. Пока высота ступеньки меньше среднего уровня шума, трудно сказать, перешагнул ли сигнал на следующую ступеньку. Таким образом, средний уровень шума является как бы единицей, измеряющей минимальную величину изменения сигнала, которую можно заметить. С другой стороны, сигнал имеет максимальную амплитуду, которую нельзя изменить, так как она зависит от физических характеристик телефонной сети. Число возможных изменений амплитуды определяется отношением максимальной амплитуды сигнала к уровню или средней амплитуде шума. Это число может быть довольно значительным, но оно никогда не возрастает бесконечно. Помня о том, что существует логарифмическая зависимость между этим числом и соответствующим количеством информации, мы увидим, что при попытке устранить шум наступает такой момент, когда мы, уменьшая шум, почти ничего не выигрываем в количестве информации.

КОДИРОВАНИЕ

Мы уже уточнили в первом приближении понятие информации, узнали, что такое структура сообщения и количество информации. Теперь перейдем к следующему аспекту — кодированию информации. Что означает технический термин «кодирование»?

Информация всегда передается в какой-нибудь материальной форме, и ни в коем случае нельзя путать информацию с формой, в которую она заключена. Разницу между ними можно показать на простом примере. Перед нами текст на английском языке; переведем его на французский, а затем с французского опять на английский. Если потом сравнить два английских текста — первоначальный и последующий, — то смысловой разницы между ними мы не найдем, но многие слова будут заменены другими. На языке философии можно сказать, что семантическая ценность текста сохранилась, несмотря на переводы с одного языка

на другой. Таким образом, семантическая ценность, или, попросту говоря, смысл текста, обнаруживается помимо слов, с помощью которых он передается. Эти слова и представляет собой то, что называется кодом. При переводе на другой язык производится информационная операция, которая касается только кода, не затрагивая семантики. В рассмотренном нами случае эта операция может быть названа перекодированием, то есть переходом от одного кода — английского языка — к другому — французскому языку.

Кодирование и перекодирование информации — очень широкие понятия. Любая информация независимо от ее сложности может быть закодирована и перекодирована. Представьте себе, что перед вами картина великого мастера. Краски и линии на картине — это язык, на котором художник передал нам то, что можно назвать информацией в самом широком смысле слова. Можно ли перекодировать эту информацию, или, иными словами, можно ли дать точное и полное описание картины, используя другой язык, другую форму? На первый взгляд кажется, что не стоит и пытаться описать произведение искусства, ничего не теряя при этом. Действительно, дать письменное описание, равноценное подлиннику, очень трудно, а может быть, и невозможно. Но только из-за этого отказываться от операции перекодирования не стоит — ведь есть и другие методы, кроме письменного описания. Например, можно мысленно нанести на поверхность картины сетку, состоящую из квадратиков, настолько мелких, чтобы каждый из них заключал в себе однородную с виду поверхность (учитывая несовершенство наших глаз или измерительных приборов). И здесь мы снова, уже в другой форме, сталкиваемся с явлением шума и его последствиями.

Когда картина разбита на мелкие участки, мы можем описать каждый из них, провести любые измерения, относящиеся к цвету, фактуре мазка и т. д., и представить результаты этих измерений в виде цифр. Тогда останется только указать положение каждого отдельного участка на поверхности полотна. С этой классической задачей хорошо знакомы картографы: на карте каждая точка фиксирована двумя цифрами, соответствующими ее широте и долготе.

Теперь вся информация, которую содержит картина, переведена на язык цифр. Линии и цвета — слова живописного языка художника — заменяются сериями цифр, которые представляют собой слова иного языка, совершенно отличного от языка оригинала. Но при этом новый язык вполне эквивалентен прежнему, потому что на основании этих цифр — при условии, что анализ проведен с исчерпывающей полнотой, — мы можем воссоздать из элементов точную копию оригинала. Подобный процесс анализа и кодирования можно применить в любом другом случае.

Если картина закодирована в виде длинных серий цифр (широта и долгота элементарных участков и результаты измерений), то самый простой метод сообщения этой информации заключается в том, чтобы записать все цифры подряд, начиная с координат каждого отдельного участка и кончая цифровыми результатами проведенных внутри каждого участка измерений. Но это требует нерационального расхода цифровых знаков. Обычно данные анализа располагают в определенном порядке и затем разбирают их последовательно по сетке. Тогда не нужно давать координаты участков: достаточно ввести в запись значки, указывающие на изменения при переходе от одного квадратика к другому и от одной строки к следующей. При этом в сообщение как бы вводится синтаксис, подобный грамматическому синтаксису, согласно правилам которого располагаются слова в обычной фразе. Но тут нужно учитывать одно из важнейших понятий в области информации — то, что называется избыточностью.

Избыточность — это процент данных, в которых нет необходимости, которые оказываются в какой-то мере излишними. Но учтите, что лишнее не всегда бесполезно. Разумеется, если каждый раз передавать описание участка и его полные координаты, то в сообщении окажется много лишнего. В случае нарушения или перерыва в связи последствия легко поправимы: ошибка или пропуск будут касаться только одного участка. Но если все компоненты расположены в определенном порядке и указания на расположение участков отсутствуют, каждая ошибка в передаче затронет многие участки или даже целую строку сообщения.

Таким образом, избыточность повышает надежность передачи информации в условиях помех или шума.

Как мы увидим, хороший синтаксис позволяет снизить избыточность информации и значительно уменьшить количество передаваемых цифр. Естественно было бы расположить эти цифры по десятичной системе, так как это всем понятно. Но, может быть, найдется другой цифровой язык, еще более экономичный и более пригодный для наших целей? Такой язык есть. И вот простой пример. Нам нужно записать число 9875. В таком виде мы его пишем привычно, машинально. Но это всего-навсего сжатая форма следующего выражения:

$$(9 \times 10^3) + (8 \times 10^2) + (7 \times 10^1) + (5 \times 10^0),$$

которое мы получаем путем последовательных делений на уменьшающиеся степени числа 10 (вспомним, что 10^0 равно 1). Но в целом нужно десять разных слов (арабские цифры от 0 до 9), чтобы представить в десятичной системе единицы, десятки, сотни, тысячи. Для того чтобы выразить число 9875, требуется сделать выбор из 4×10, то есть из сорока знаков. Более простой цифровой язык употребляет всего два знака или слова — 0 и 1.

Создать системы, имеющие только два определенных состояния, так называемые бинарные системы, нетрудно. Самая простая из них — прерыватель, включенный или выключенный. Вместо того чтобы разлагать число 9875 на последовательные степени числа 10, можно просто разложить это число на степени числа 2. Результат:

$$9875 = (1 \times 2^{13}) + (0 \times 2^{12}) + (0 \times 2^{11}) + (1 \times 2^{10}) + (1 \times 2^9) + \\ + (0 \times 2^8) + (1 \times 2^7) + (0 \times 2^6) + (0 \times 2^5) + (1 \times 2^4) + (0 \times 2^3) + \\ + (0 \times 2^2) + (1 \times 2^1) + (1 \times 2^0)$$

может быть записан в такой простой форме:

1 0 0 1 1 0 1 0 0 1 0 0 1 1.

Для выражения бинарного числа из 14 цифр нужно сделать выбор из 14×2, то есть из 28 возможных

знаков вместо 40, как в предыдущем случае. Это значительная экономия. А нет ли еще более удобной системы разложения, которая оказалась бы и наилучшей с точки зрения экономии знаков? Да, еще экономичнее использовать степени числа *e* (оно равно 2,7828). Но это число не целое, и его нельзя брать за основу вычислений. Следующее целое число — 3, но его преимущества перед двойкой очень невелики. График на рис. 7 доказывает, что с увеличением основания степени выигрыш становится все меньше. Наиболее экономичным было бы число 3, но практические выгоды говорят в пользу двойки. Бинарное кодирование широко применяется в вычислительных устройствах и в природных системах; это нам еще предстоит узнать. Имеет оно и еще одно преимущество: использование двух символов, 0 или 1, напоминает нам о битах информации.

Итак, что мы узнали об информации? Она поддается количественному измерению, и, что очень важно, небольшой прирост количества информации соответствует значительному увеличению сложности рассматриваемой ситуации; любая информация передается в определенной форме, которую можно назвать — в общем смысле — языком. Эту форму можно перекодировать, перевести с одного языка на другой, например на язык цифр. В последнем случае бинарная форма слов цифрового языка оказывается самой простой и — по счастливому совпадению — практически наиболее удобной.

Все это относится к внешней стороне информации: структуре, экономичному кодированию, передаче (не следует забывать об избыточности, имеющей большое значение для надежности передачи информации). Остается другая сторона, так сказать, внутренняя: смысл сообщения, субъективное значение информации, которую оно несет. В начале этой главы, говоря о единицах информации, мы задавали вопрос: «Родится мальчик?» Понятно, что для отца ответ «да» или «нет» имеет огромное значение, тогда как служащему, который регистрирует рождение младенца, это довольно безразлично. Один и тот же бит может иметь субъективную ценность, которая зависит от того, кто получает сообщение, и эта ценность сильно варьирует.

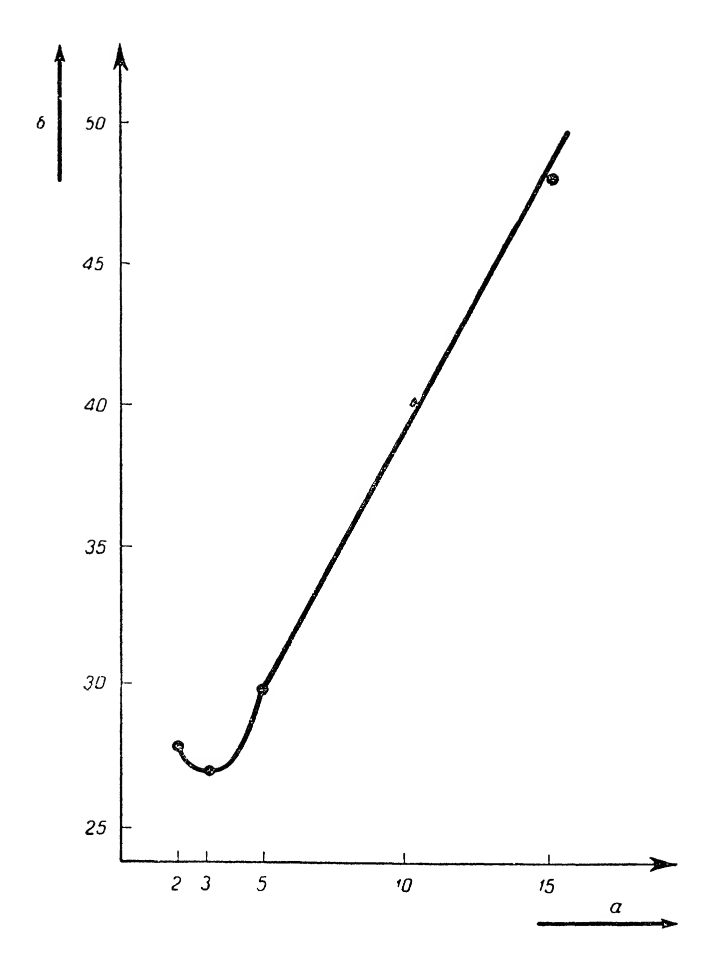


Рис. 7. Количество цифр, необходимое для записи числа 9875.
а — основание степени; *б* — количество цифр в зависимости от основания степени.

Надо признаться, что при таких условиях создать теорию, которая бы количественно оценивала качество внутреннего содержания информации, невероятно трудно! Количественное измерение информации — это

всего-навсего оценка точности передачи информации, а никак не ее семантической ценности.

Мы сделали только первый шаг в изучении этого сложного понятия. В дальнейших рассуждениях мы будем касаться только количественных характеристик информации; однако качественную сторону вопроса нельзя совсем упускать из виду, несмотря на то что теоретически она еще не разработана.

ГЛАВА 3
СИСТЕМА И МОДЕЛЬ

ЧТО ТАКОЕ СИСТЕМА

Бионика занимается изучением и реализацией искусственных систем, и в частности машин, которые являются копиями живых моделей или используют принцип их действия — определение нам уже знакомое. Но теперь мы обратим внимание на слово «система». Согласно новой точки зрения это слово все чаще применяется по отношению и к неодушевленным предметам и к живым существам. Относится оно к объектам, неодинаковым по размерам и значимости. Известно, например, что нервная система человека состоит из десяти миллиардов простых клеток (нейронов), из которых сформированы отдельные анатомические образования (кора мозга, средний мозг, мозжечок и т. д.), связанные между собой отростками нейронов, образующих нервные пути. Но для нейрофизиолога, который ежедневно открывает все более тонкие особенности отдельных нейронов, сама элементарная клетка представляется чрезвычайно сложной системой. В военном деле мы говорим, например, о системе обороны, имея в виду грандиозные комплексы, которые включают в себя огромные соединения пехоты, военно-воздушные и военно-морские силы, артиллерию, а также целую сеть радаров и мощное радиоэлектронное оборудование. Если заняться изучением только одного самолета или одной вычислительной машины, то каждый из этих объектов, бесспорно, можно признать настоящей системой. Как видите, слово «система» имеет весьма разнообразное применение.

Чтобы разобраться в этом вопросе еще лучше, чтобы понять проблемы взаимосвязей между искусственными и природными системами (не забывайте, что это и есть предмет бионики), необходимо найти принципиальное единство, скрытое за внешними различиями в их строении.

Что же такое система? Согласно словарю, это совокупность элементов, связанных общей функцией. Что характеризует систему? Прежде всего ее элементы должны быть так или иначе связаны. Если они расположены как попало, получается не система, а бесформенная, ни к чему не пригодная масса. Сама по себе совокупность элементов еще не создает системы: атомная решетка кристалла представляет собой удивительно правильную совокупность атомов, но это еще не система, потому что она не рассчитана на выполнение определенной функции. Кристалл полностью замкнут в себе и останется неизменным, если, конечно, не будет разрушен. Живая клетка, наоборот, растет, питается и воспроизводит себя, подчиняясь своему назначению — продолжать жизненный процесс. Это и есть настоящая система, потому что ей присуще то, что отсутствует в кристалле, — установка к действию. Именно потому, что система имеет определенное назначение, распределение элементов в ней никак не может быть случайным. Этот существенный признак (полная противоположность всему случайному) напоминает нам то, что говорилось в отношении информации. Невольно напрашивается сравнение этих двух понятий, и мы догадываемся, что информация должна играть первостепенную роль во всем, что касается систем.

ИЕРАРХИЯ В СИСТЕМАХ

Приведенные выше примеры — нервная система и система обороны — сходны по крайней мере в одном: составляющие их элементы сами по себе являются системами. Отсюда возникла мысль ввести различные иерархические уровни, чтобы упорядочить изучение систем. Разберем хорошо знакомый пример — телефонную сеть.

Начнем с того, что у каждого абонента есть свой телефонный аппарат. Но этот аппарат имеет собственное назначение: все детали вместе несут определенную функцию — преобразовать звук человеческого голоса в электрические сигналы (функция микрофона) или, наоборот, электрические сигналы, передающиеся по

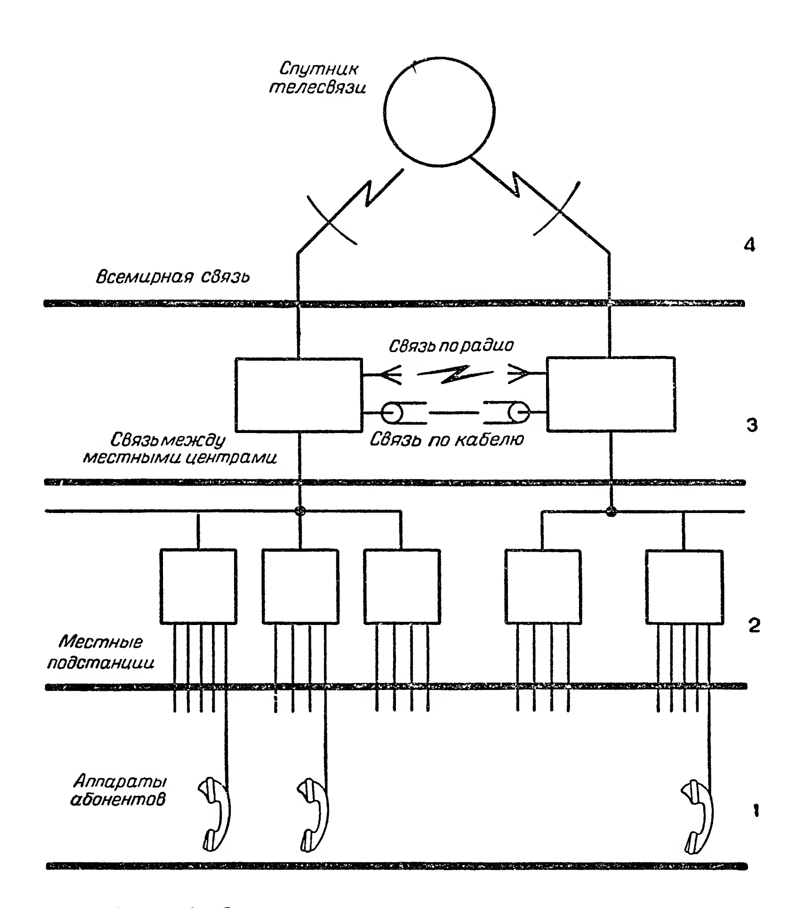


Рис. 8. Системы и подсистемы в телефонной сети.

Уровень *1* — подсистемы (абоненты); уровень *2* — подсистемы (местные подстанции); уровень *3* — система связи подстанций; уровень *4* — сверхсистема всемирной связи через спутники.

проводам, — в слышимые звуки (функция наушника). Таким образом, аппарат сам по себе является системой. Но если взять телефонную сеть в целом, аппарат можно назвать подсистемой всей телефонной системы. Введение иерархии позволяет легко разобраться в этом. На рис. 8 показаны 4 уровня: подсистема отдельных аппаратов (уровень *1*), подсистема местных подстанций (уровень *2*) и объединяющая их система

связи на уровне области или даже целой страны (уровень 3). Все это венчает сверхсистема связи, осуществляемая при помощи спутников (уровень 4). Три стационарных спутника, расположенных вдоль экватора на расстоянии 36 000 километров от поверхности Земли, могут обеспечить непосредственную связь между любыми двумя точками земной поверхности.

Понятие иерархии хорошо знакомо тем, кто изучает живую природу. По мере того как растет многообразие машин, используемых человеком, и широкое применение получают сложнейшие комплексы механизмов, понятие иерархии становится необходимым и в мире техники. Только оно позволяет правильно подойти к изучению сложных систем. Как это часто бывает, попытка объять необъятное кончается конфузом. А если подразделить целое на подсистемы, повторяя эту операцию в случае необходимости несколько раз, то в конце концов можно получить достаточно простые для изучения компоненты. Потом нужно как бы вновь подняться по лестнице, восстанавливая из элементов единое целое.

Только нет ли здесь какой-нибудь ловушки? Не слишком ли сложно выводить свойства и функции целой системы из функций и свойств ее элементов? Может быть, это не менее трудно, чем понять целое, не разделяя его на части? К счастью, дело обстоит не так. И это зависит от одного из основных понятий в области изучения систем — от передаточной функции.

Так как система имеет определенное назначение, она непременно должна быть связана с внешней средой. Более того, внешняя среда может представлять собой другой элемент сложной системы. Поэтому на любом уровне система или подсистема не замкнута, не заключена в самой себе, у нее всегда есть выход. А если есть выход, значит, имеется и вход, который, как и выход, сообщается со средой. На вход поступает нечто из внешней среды (энергия или информация, либо то и другое), и это нечто проходит через все компоненты системы, анализируется, преобразуется, усиливается и, наконец, появляется на выходе. Такая последовательность операций внутри системы и называется «преобразованием». Каждое изменение на входе влияет на результаты на выходе, а переда-

точная функция говорит о том, каким образом это происходит.

Эти рассуждения могут показаться несколько отвлеченными, но простой пример разъяснит нам, что в понятии передаточной функции, в сущности, много знакомого. Возьмем систему, представляющую собой электродвигатель с относящимися к нему блоками питания и проводкой. На выходе имеется некоторая мощность. Вход, или скорее входы, потому что их два, соединяются с выключателем, источником питания и стартовым реостатом. (При помощи рукоятки реостата человек, управляющий машиной, вручную регулирует скорость электродвигателя.) Чтобы изобразить двигатель и связанные с ним приборы — реостат, источник питания, выключатели и т. д. (список очень велик), — потребуется целая серия чертежей и рисунков, необходимых для конструктора. Однако в этом нет никакой надобности, если мы хотим уяснить себе порядок операций и передаточную функцию. Для этой цели можно отбросить все избыточные сведения и просто рассмотреть схему какого-нибудь мотора.

На рис. 9, *а* показана такая схема — результат сознательного упрощения. В данном случае неважно, какой тип выключателя используется, неважно и то, какой ток — в 30 или в 50 ампер — прерывается этим выключателем. Важно, что выключатель — приспособление, действующее по принципу «все или ничего». Нам также безразлично, равно ли сопротивление реостата 1000 или 10 000 *ом* — для нас это всего лишь прибор, плавно регулирующий скорость. Если упростить рис. 9, *а*, получится схема, показанная на рис. 9, *б*. Отдельные обозначения на этих схемах совпадают, но сразу видно, что рис. 9, *б* гораздо больше обобщен, он представляет собой схему действия любого мотора. Переход от рис. 9, *а* к рис. 9, *б* иллюстрирует применение понятия «система». Схема 9, *б* дает материал для более широкого обобщения. Можно еще больше упростить схему. На рис. 9, *в* мы видим всего один блок с двумя входами (*1* — включение и *2* — регулирование скорости) и выходом. Эта единственная блок-схема и есть тот знаменитый «черный ящик», который так полюбился кибернетикам. Совсем не обязательно знать, что именно происходит

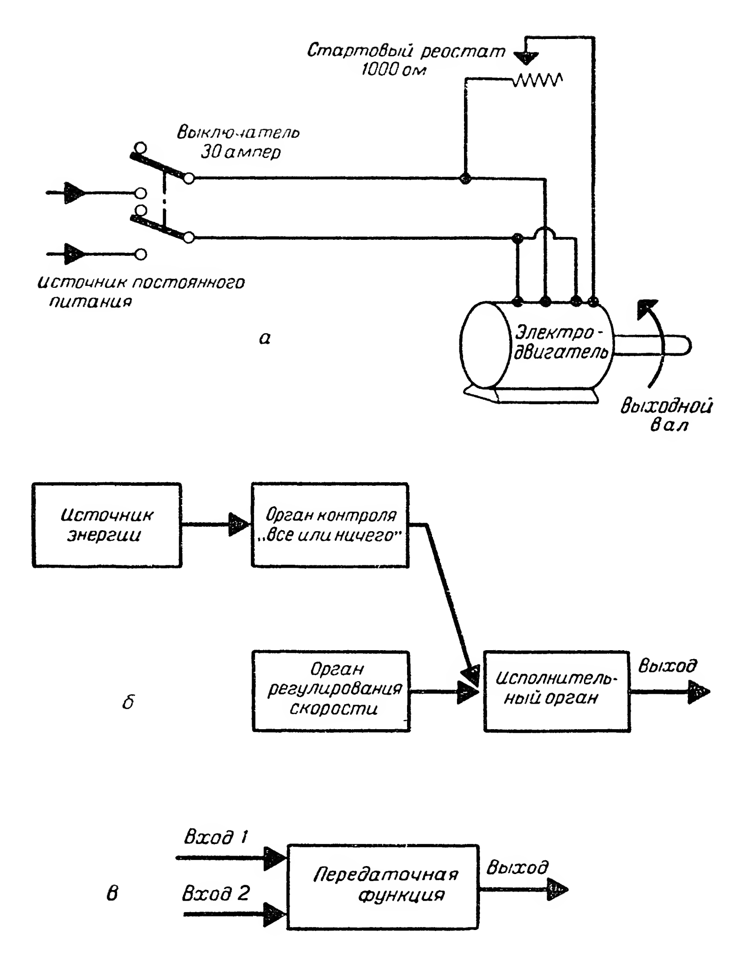


Рис. 9. Схема и блок-схема электродвигателя с управлением.
а — схема; *б* — схема из блок-схем; *в* — обобщенная блок-схема.

внутри черного ящика, потому что при изучении систем важно другое — определенные условия на входе дадут соответствующие результаты на выходе. Короче, важно знать передаточную функцию черного ящика.

Использование черного ящика, или метода блок-схем, позволит нам, по крайней мере в теории (на практике могут возникнуть трудности), вывести все

характеристики сложной системы, исходя из отдельных подсистем. При необходимости можно повторить несколько раз, на разных иерархических уровнях, то упрощение, которое мы произвели при переходе от схемы 9, *б* к схеме 9, *в*.

СИСТЕМА С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ: РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬ ЗЕРНА

В электродвигателе мы встречаем пример простой передаточной функции, потому что здесь результат на выходе практически пропорционален сигналу на входе. Но представим себе, что работа двигателя как-то нарушается. Если при этом не поступит соответствующего сигнала, меняющего режим работы, некоторые детали могут выйти из строя. Возможны также нарушения в системе питания, которые могут испортить двигатель. В этих случаях наблюдающему за двигателем приходится срочно действовать, например отключать его. А если человек отошел, занялся другим делом или просто отвлекся? Удобнее было бы ввести в систему автоматический контроль. Для этого результат на выходе нужно проанализировать, измерить и вернуть на вход, где он вместе с прямым сигналом управления даст нужный результат, — система как бы замкнется сама на себя. Принципиальная схема подобной системы дана на рис. 10.

Петля обратной связи, или feed-back, позволяет установить статическое или динамическое равновесие. Практически все живые системы используют обратную связь, а теперь она постепенно завоевывает место и в области механики. Однако это не значит, что идея системы с обратной связью — последняя новинка в машиностроении. Широкое распространение этой идеи связано с развитием электроники, но сама она существовала еще задолго до появления этой науки. Наиболее старинный пример такой системы — распределитель зерна на мельнице. Кто изобрел его? Неизвестно. Когда он появился? Трудно сказать. Неопределенные и обрывочные сведения встречаются еще в рукописях эпохи Возрождения. Распределитель зерна описан в Большой энциклопедии, изданной в XVIII веке французским философом Даламбером.

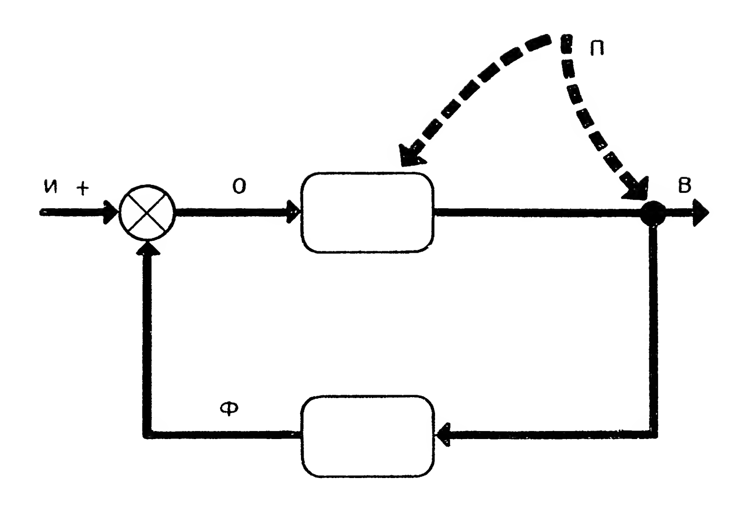


Рис. 10. Схема системы с обратной связью.

Требуется сохранить, независимо от помех, постоянный результат на выходе.

И — инструкции на входе или желательный результат на выходе; *О* — ошибка (*И* — *Ф*); *П* — помехи; *В* — реальный результат на выходе; *Ф* — петля обратной связи (фидбек).

Скорость вращения мельничных жерновов меняется, так как зависит от порывов ветра. Если зерно подается на жернова недостаточно быстро, они трутся друг о друга и перегреваются. Если же зерна много, а жернова крутятся медленно, то зерно забивает механизм и все останавливается. Мельнику приходится все время следить за скоростью ветра. А ведь не секрет, что ему хочется и поболтать, и подремать. И вот в один прекрасный день самый ленивый — но гениально ленивый — мельник изобрел средство, которое позволило ему преспокойно спать, не обращая внимания на капризы ветра.

Это был распределитель зерна. На рис. 11 показано, как работает такая система. Зерно подается в приемный ковш и по деревянному желобу (потряску) попадает на жернова. Желоб слегка наклонен, но этого еще недостаточно. Чтобы зерно сыпалось, нужно время от времени встряхивать желоб. Вот как это описано в энциклопедии: «Желоб расположен так, что

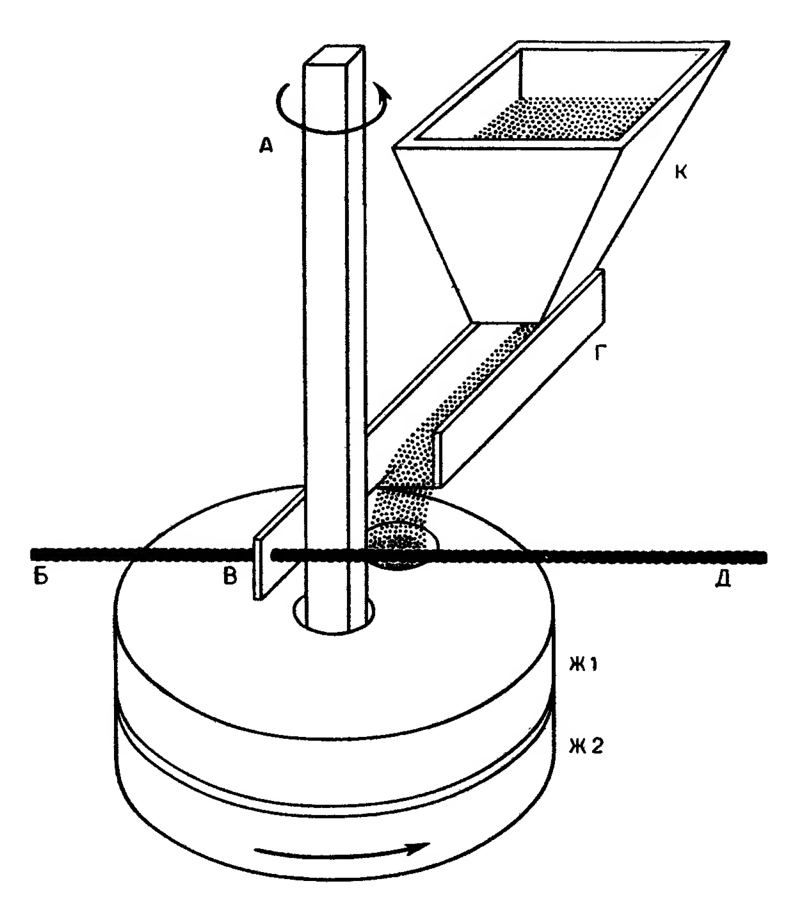


Рис. 11. Распределитель зерна, прототип систем с обратной связью.

К — бункер (приемный ковш); *А* — главная ось мельницы; *ВГ* — желоб, подающий зерно на жернова; *Ж1*, *Ж2* — жернова; *ВД* — веревка, регулирующая подачу зерна, — распределитель зерна; *Б* — точка прикрепления веревки *БВ*

его нижний конец прикасается к тяжелому квадратному валу, сделанному из железа (ось мельницы). Когда вал поворачивается, он задевает за покатый желоб и встряхивает его, благодаря чему зерно попадает на жернова, где и перемалывается. Но так как необходимо, чтобы на жернова попадало попеременно

то больше, то меньше зерна, было изобретено приспособление, с помощью которого этого легко достигнуть. На конце желоба есть две небольшие веревки — *ВБ* и *ВД*... Если натянуть веревку *ВД*, она прижимает конец желоба к валу и он получает более сильные и частые толчки. Ее и называют распределителем зерна». Чем быстрее вращается вал, тем чаще толчки. При каждом толчке зерно продвигается по желобу вниз. Это превосходный пример того, как результат на выходе изменяет сигналы на входе.

Безусловно, не следует думать, что все системы с обратной связью так изумительно просты, как распределитель зерна. К тому же часто встречается не одна, а много петель обратной связи, и сложность передаточной функции настолько возрастает, что ее почти невозможно рассчитать. Нередко передаточную функцию невозможно вычислить еще и потому, что доступ внутрь системы закрыт. Это относится, как правило, к живым системам. Но в любом случае действие на выходе связано определенной закономерностью с сигналом на входе, и эта закономерность называется «передаточной функцией системы». Если у нас есть исчерпывающие сведения об этой закономерности, можно узнать, какие сигналы будут получены на выходе при определенном характере сигнала на входе. Зная передаточную функцию и результат на выходе, можно определить сигнал на входе. Однако в большинстве случаев передаточная функция плохо изучена или вовсе неизвестна, поэтому при изучении особенно сложных систем, — а к ним относятся все биологические системы — нужно прежде всего начинать с определения передаточной функции. Можно попытаться решить проблему экспериментальным путем, отыскивая эмпирические связи между входом и выходом. Но это очень неблагодарный, трудный путь, который грозит опасностью окончательно заблудиться в лабиринте. И вместо того, чтобы исследовать все тупики, лучше обратиться к методу разложения на подсистемы, установить иерархию подсистем, подразделяя их до тех пор, пока отдельные элементы не будут достаточно просты, чтобы изучить их передаточную функцию, а затем воссоздать картину из от-

дельных элементов, как в детской игре-головоломке, и разобраться в том, как функционирует система в целом.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ

При изучении живых существ трудно разграничить системы и подсистемы и точно определить границы между ними. Но даже преодолев эту первую трудность, не всегда удается экспериментировать по собственному плану, потому что живые системы существуют в очень жестких границах; например, температура тела должна быть постоянной с точностью до одной десятой градуса. Кроме того, живая система почти всегда чудовищно сложна. Так, сетчатка человеческого глаза содержит десятки миллионов простых чувствительных клеток; они связаны сетью из миллионов нервных волокон с головным мозгом, а мозг состоит из миллиардов взаимосвязанных нервных клеток. Описание элементов зрительной системы можно найти в бесчисленных специальных научных трудах, но, пытаясь понять и объединить все отдельные функции, можно безнадежно запутаться. И это не единичный случай. Все биологические системы, даже наиболее простые из них, оказываются чрезвычайно, а подчас и бесконечно сложными. Они включают в себя многочисленные петли обратной связи, расположенные в иерархическом порядке. Часто в приспособительном поведении учитывается весь прошлый опыт живого существа. Не всегда удается широко варьировать сигналы на входе: слишком легко перешагнуть порог разрушения органа. При измерении сигналов на выходе также возникают трудности, и из-за высокого уровня внешнего шума получаются неточные результаты. В общем надо сознаться, что далеко не всегда можно определить передаточную функцию или найти ее экспериментальным путем, так как свобода эксперимента ограничивается порогом разрушения органа. Значит, если нужно сконструировать машины по образу и подобию живых систем, первое условие —

это пристальное изучение природной системы и определение ее передаточной функции. Только это позволит предсказать поведение системы по отношению к новым сигналам на входе, к новым раздражителям. Не всегда удается применить метод разложения сложной системы на простые элементы с последующей реконструкцией ее сложных функций на основе изучения элементарных функций. Но нельзя отказываться от задачи только потому, что она трудна. В этом случае в наших руках есть мощное оружие — использование моделей и весьма эффективный метод исследования — имитация функций.

Применение моделей основано на следующих соображениях. Согласно определению, система — это совокупность элементов, связанных общей функцией. Элементы конкретны и реальны: как правило, это металлические детали или химические молекулы; их совокупность столь же конкретна — ее можно отразить в чертежах и рисунках. Функционирование такой системы во времени подчиняется определенному ритму и последовательности, которые для нее характерны и могут быть точно описаны. Как мы убедились, функционирование системы легче всего объяснить с помощью блок-схем. Такая схема, если она правильно составлена, отражает наиболее общий случай и представляет собой теоретическую систему, построенную на основе изучения реальной системы. Чтобы лучше понять описанную выше методику и подвести итоги, применим снова знакомую нам блок-схему (рис. 12). Отдельные этапы работы показаны буквами, заключенными в рамки, а необходимая работа и результаты — стрелками. Как видите, метод блок-схем находит самое широкое применение. А разве метод работы сам по себе нельзя назвать системой? Это ведь по сути дела тоже сочетание элементов (этапов и операций), организованных для достижения определенной цели.

Поэтому вполне естественно, что сам метод может стать предметом изображения на блок-схеме. В дальнейшем мы не раз будем прибегать к помощи таких схем, чтобы подвести краткий итог длинным рассуждениям.

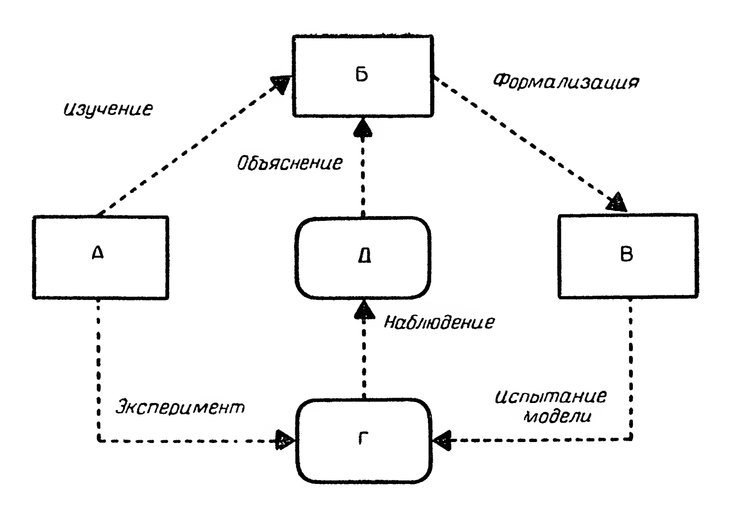


Рис. 12. Изучение системы при помощи модели — макета в уменьшенном масштабе или математической модели.

А — изучаемая система; *Б* — теоретическая система; *В* — модель; *Г* — сравнение поведения реальной системы и модели; *Д* — усовершенствование модели на основе полученных результатов.

Вернемся к рис. 12. Мы уже перешли от реальной системы *А* к теоретической системе *Б*, созданной в результате глубокого ее изучения. На основе системы *Б* происходит абстрагирование, упрощение; при необходимости картину можно априори дополнить гипотезой (*Д*), степень точности которой будет подтверждена и уточнена в дальнейшем. На этой стадии мы пытаемся заменить функциональный план, составленный из блок-схем, цифровыми обозначениями. Эту фазу можно назвать фазой формализации. Она отражена в объекте *В*, который называют моделью. Каково же истинное отношение этой модели к реальной системе, на основе которой она создана?

Для каждой системы характерно определенное поведение, то есть совершенно однозначная реакция на изменения окружающей среды. Предполагается, что две организации (теоретическая система и модель) эквивалентны, если они отвечают одинаковым изменением поведения на одинаковые изменения внешней среды. Заметим сразу, что раздражители из внешней

среды, то есть сигналы на входе, никогда не отличаются абсолютной чистотой — как всегда, вмешивается шум. Кроме того, передаточная функция биологической системы не постоянна, она часто меняется, и эти изменения невозможно предвидеть. Когда, например, человек «в форме», ему все удается гораздо лучше. В биологии поведение почти всегда — статистическая величина: всегда есть какой-то шанс — сто, семьдесят или восемьдесят процентов вероятности, что на определенное изменение среды реальная система ответит именно такой реакцией. Сравнивая поведение реальной системы и поведение модели, допустимо только сказать, что в среднем оно одинаково, причем небольшими индивидуальными отклонениями можно пренебречь.

Тот, кто построил модель, волен с ней обращаться, как ему угодно, и подвергать ее любым раздражениям. Здесь происходит так называемая имитация: поведение модели в эксперименте копирует поведение реальной системы; при этом она, разумеется, обнаруживает реакции, знакомые по поведению копируемой системы. Но можно отвлечься от известных реакций и проверить, как модель реагирует на новый раздражитель. Исходя из полученной реакции, можно составить план новых экспериментов и провести их уже на реальной, живой системе.

Очень часто отличие результатов, полученных на модели, от экспериментальных данных позволяет усовершенствовать модель, а иногда и более точно определить передаточную функцию реальной, живой системы. Именно эта возможность постоянного сравнения, проходящего по петле *БВГД* на рис. 12, и делает метод моделирования таким плодотворным. При этом иногда неточная, даже неверная модель может принести больше пользы, чем совершенно точная копия. Это не шутка: несовершенная модель не дает ожидаемых результатов, и в поисках ошибки об изучаемой системе часто узнают гораздо больше, чем если бы все шло гладко с самого начала.

В области бионики моделирование перекидывает мост через пропасть между инженерами и биологами. Хорошая модель позволяет специалистам самых отдаленных областей понять друг друга, несмотря на раз-

ницу в терминологии. Действующая модель копирует реальное поведение изучаемой системы, она помогает уточнить те изменения, которые надо внести в модель, чтобы достигнуть более полного сходства в подражательном и реальном поведении. Короче говоря, она действует как закваска, благодаря которой созревают идеи. А рождение новых идей — необходимое условие для плодотворных исследований.

При конструировании моделей нужно избегать ошибок двоякого рода. С одной стороны, опасно за деревьями не видеть леса (то есть придавать слишком большое значение деталям, стараясь как можно точнее скопировать данный орган), с другой — не менее опасно видеть только лес, не замечая, что он состоит из деревьев (это тот случай, когда реальную систему чересчур упрощают).

Метод моделирования широко применяется во многих областях науки и техники. На уменьшенных моделях издавна испытывается форма корпуса кораблей. Так же давно измерением деформаций, полученных на макетах, проверяется прочность мостов. Такого рода модели можно назвать физическими, потому что они подчиняются тем же законам, которые действуют в реальной системе, и точно повторяют ее в уменьшенном масштабе. Эластичное покрытие подводных лодок является одновременно и бионическим открытием и физической моделью кожи дельфина.

Другой тип модели — естественная модель: изучение очень сложной биологической функции на наиболее подходящем для этого объекте. Как известно, нервы человека состоят из чрезвычайно тонких волокон, измеряемых десятитысячными долями миллиметра. Как исследовать сложные процессы, идущие внутри этих тончайших волокон? К счастью, есть такое животное — кальмар, у которого некоторые нервные волокна достигают почти миллиметра в диаметре. Эти гигантские волокна идут к мышцам, сокращающим сумку, при помощи которой животное движется реактивным способом, подобно ракете. В такие нервные волокна можно вводить миниатюрные электроды и даже брать пробы содержимого при помощи крошечных пипеток. Естественно предполагать, что нервы человека действуют по тем же принципам, поэтому все, что мы

узнаем о нервах кальмара, будет верно и по отношению к человеку. Вот что такое естественная модель.

Еще один пример, относящийся к нервной системе. Известно, что нервные сигналы представляют собой электрические импульсы. Какова природа этого «нервного» электричества? Непосредственно изучать это явление мешают незначительные размеры органов, где оно рождается. Но у некоторых рыб — электрических скатов и электрических угрей — есть крупные органы, генерирующие сильные электрические импульсы. Эти органы можно тщательно и всесторонне исследовать, чтобы получить новые данные о процессе возникновения электрических импульсов в нервной ткани.

Естественные модели не только могут имитировать отдельные органы, но и служат для изучения функций организма в целом. Феномены человеческой памяти почти не поддаются изучению — настолько сложны физиологические структуры, с которыми она связана. В этой области большую роль играет наблюдение нарушений памяти при различных заболеваниях. Но экспериментальная проверка данных немыслима, когда речь идет о человеке: нельзя специально производить разрушения в мозгу и наблюдать последствия. Но если такие опыты на людях недопустимы, то, может быть, некоторые из них можно провести на животных? Нужно только предположить, что феномены памяти сходны в своей основе у всех живых существ, независимо от уровня их эволюционного развития.

Прекрасной моделью в этом смысле оказались осьминоги. Осьминогов нетрудно разводить, содержать, их можно научить выполнять простые действия, чтобы исследовать, как они их запоминают. Далее мы увидим, что эти опыты подтвердили некоторые предположения, возникшие при наблюдениях над потерявшими память людьми, и привели к открытию основных механизмов памяти человека. В этих опытах примитивный мозг осьминога служил естественной моделью более совершенного мозга человека.

Описанные выше физические модели для сравнительных исследований живых систем и машин относятся, несомненно, к области бионики. Это модели, которые приводят к бионическим конструкциям.

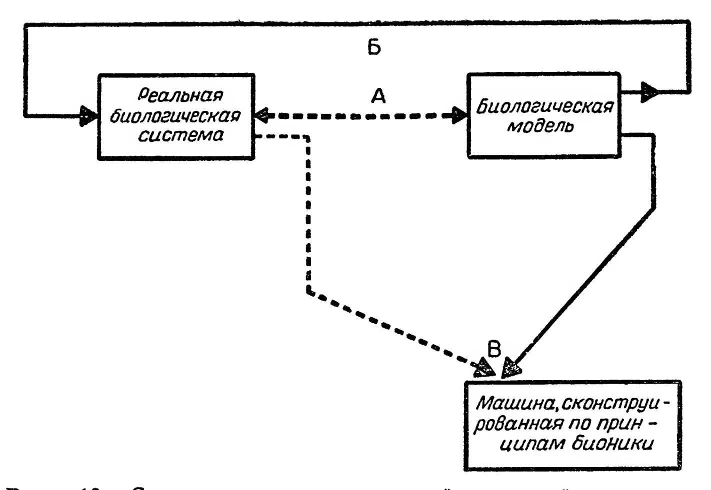


Рис. 13. Соотношение между живой системой и моделью с точки зрения кибернетика и бионика.

А — процесс моделирования; *Б* — кибернетическое объяснение; *В* — работа бионика.

Естественные модели нельзя считать бионическими конструкциями, так как в них нет ничего от искусственного механизма. Но они могут оказаться очень полезными для понимания некоторых сложных и скрытых биологических механизмов. А понимание этих механизмов дает бионикам идеи для создания новых машин.

Несмотря на то что физические и естественные модели приносят немалую пользу, все-таки наибольшее распространение получили математические модели, которые связаны с работой электронных вычислительных машин — аналоговых или цифровых.

Вместо того чтобы добиваться аналогий с природой, изучая физические и естественные модели, ученые создают формальные аналоги, то есть идентичные математические уравнения для модели и для абстрактной теоретической системы, полученной на основе изучения реальной системы. Повторяется процесс, показанный на рис. 12. Метод аналоговых моделей относится скорее к области кибернетики. Самые яркие примеры приложения таких моделей в кибернетике — знаменитые кибернетические животные: механизмы,

которые при помощи нескольких реле и моторов имитируют довольно сложное поведение животного. Кибернетик использует эти действующие модели для объяснения функций живой системы.

Знакомясь с предметом бионики, мы уже имели случай сравнить бионику и кибернетику. Теперь можно добавить еще несколько отличительных признаков, учитывая неодинаковый подход этих наук к соотношению модели и живой системы. Кибернетический подход кажется противоположным бионическому, но при этом обе стороны тесно связаны. Грей Уолтер выразил это так: «Бионика и кибернетика — это две стороны одной и той же медали». Та же пара «реальная система — модель» может служить как бионику, так и кибернетику. Это показано на рис. 13. Каждый ученый подходит к этой паре со своей точки зрения. Кибернетик, наблюдая функционирование модели, делает выводы, объясняющие свойства живых систем, и подает биологам идеи новых экспериментов; бионик для конструирования машины пользуется характеристиками естественной системы, применяет новые идеи, возникшие во время работы с моделью, или новые знания о функциях организмов.

ГЛАВА 4
СВЯЗИ ВНУТРИ ОРГАНИЗМА

ЭНЕРГИЯ И ИНФОРМАЦИЯ

Итак, бионика, согласно определению, — наука о системах, функции которых копируют функции природных систем, или о системах, которые являются аналогами природных систем. Обмен информацией — непременное условие существования системы. Разъяснив понятия «информация» и «система», звучащие, надо сказать, несколько абстрактно, пора перейти к конкретным примерам, поясняющим, что такое бионика. Обратимся к нескольким темам, которые служат предметом размышления биоников.

Каждая биологическая система, точнее, каждое живое существо, получает питание из внешнего мира в виде пищи или солнечного излучения. Эта энергия перерабатывается и потребляется на поддержание жизнедеятельности организма. Но мало-помалу становится ясно, что, как бы важна ни была энергетическая сторона жизни, все же она не самая главная и уступает первое место информации. Поэтому нам придется сначала заняться информационными процессами, чтобы уже на более высоком уровне вернуться к явлениям жизни и энергетическим процессам.

Итак, рассмотрим систему «живое существо» с точки зрения обмена информацией. В первую очередь в живом существе, как и во всякой системе, можно найти входы; это органы чувств. Затем мы обнаружим целую сеть коммуникаций, направляющих полученные ощущения по пути простых ответных реакций (так называемых «рефлексов») * или по пути более сложных действий, требующих участия головного мозга. Определенные действия осуществляются органами на выходе (мышцами). Конечно, не следует забывать особенностей реакций на входе и выходе: произведенное действие всегда автоматически оценивается, сознательно или бессознательно, — это такое

* Очевидно, имеются в виду спинномозговые рефлексы.

же ощущение, как и все остальные, и воспринимается оно точно так же. Казалось бы, при изучении системы «живое существо» логично начать, так сказать, с начала, то есть с органов чувств на входе, а потом уже проникнуть в глубины организма вдоль его коммуникационных линий. На деле этот логически обоснованный путь оказывается не самым удобным: гораздо лучше начать именно с коммуникационной сети. Характеристики сигналов, циркулирующих в этой сети, неопровержимо доказывают глубокое единство, скрытое за видимым разнообразием органов чувств. Именно это принципиальное единство необходимо раскрыть в первую очередь; да и само слово «система» наводит на мысль, что сначала нужно определить общие закономерности, а потом уже заниматься частностями.

Связи внутри организма осуществляются на различных уровнях. Легче всего начать с самого элементарного уровня — с клетки. Но и она представляет собой сложнейшее химическое производство, где одновременно идет множество высокоспециализированных реакций. Четкость работы всего комплекса требует постоянного циркулирования информации, обмена информацией со средой. Однако пока что клеточные механизмы не нашли применения в бионике. А вот кибернетика может сыграть в этом вопросе важную роль, объяснив при помощи моделей сложные функции этого миниатюрного химического комбината.

Поднявшись на следующую ступень иерархической лестницы, мы переходим к специализированным системам связи; их можно найти в каждом живом существе. Дальнейшее развитие химической связи между клетками — эндокринная, или гормональная, система. Эта система действует сравнительно медленно, но очень широко, выделяя в кровь химические вещества, называемые гормонами. Гормоны разносятся по организму током крови. Так, перед неожиданной опасностью нас охватывает страх — в кровь выбрасывается большое количество адреналина, который вызывает дрожь, учащенное сердцебиение, а иногда и полную неподвижность. Эти реакции порой эффективны, но они не обладают достаточной гибкостью и разнообразием. И здесь бионика пока не нашла для себя ничего интересного.

СВЯЗИ В НЕРВНОЙ СИСТЕМЕ

Но все меняется, когда мы переходим на следующую ступень — на уровень нервной системы. Эта система — настоящее чудо эволюции; она постепенно достигла высокого совершенства. Степень развития нервной системы определяет положение вида на древе эволюции.

На микроскопическом уровне нервная система состоит из клеток, называемых нейронами; что же касается макроскопического уровня, то разговор уже пойдет о нервах, ганглиях, спинном мозге, мозжечке, больших полушариях. Каждый из этих органов подразделяется анатомами на такое множество составных частей, что все их здесь просто невозможно рассмотреть. Чтобы понять важнейшие особенности связей в нервной системе, которые интересуют бионика, достаточно вспомнить строение нейрона. Как видно на рис. 14, нейрон состоит из тела, внутри которого, как и в любой другой живой клетке, находится ядро, управляющее всеми его функциями. Тело нейрона измеряется сотыми и десятыми долями миллиметра. От него отходят многочисленные ветвистые отростки — дендриты. Один из отростков резко отличается от остальных — он значительно длиннее и кончается мелкими бляшками, «синапсами». Этот отросток называется аксоном и служит проводником информации. При диаметре, не превышающем у человека сотой доли миллиметра, он может достигать метровой длины; например, аксоны клеток, расположенных в головном мозге, заканчиваются у основания спинного мозга. Аксон обычно одет слоем белого изолирующего вещества — миелина. В нервной ткани аксоны не изолированы, они образуют сложное переплетение, настоящую сеть проводников. Но это не непрерывные проводники, как, например, сосуды кровеносной системы. Несмотря на очень тесное переплетение, концевые синапсы аксонов не соединяются с телами или дендритами других нейронов. Нервный импульс мог бы распространяться по цепи взаимосвязанных нейронов двумя путями:

Тело клетки → Аксон → Синапсы → Тело клетки

или

Тело клетки → Синапсы → Аксон → Тело клетки.

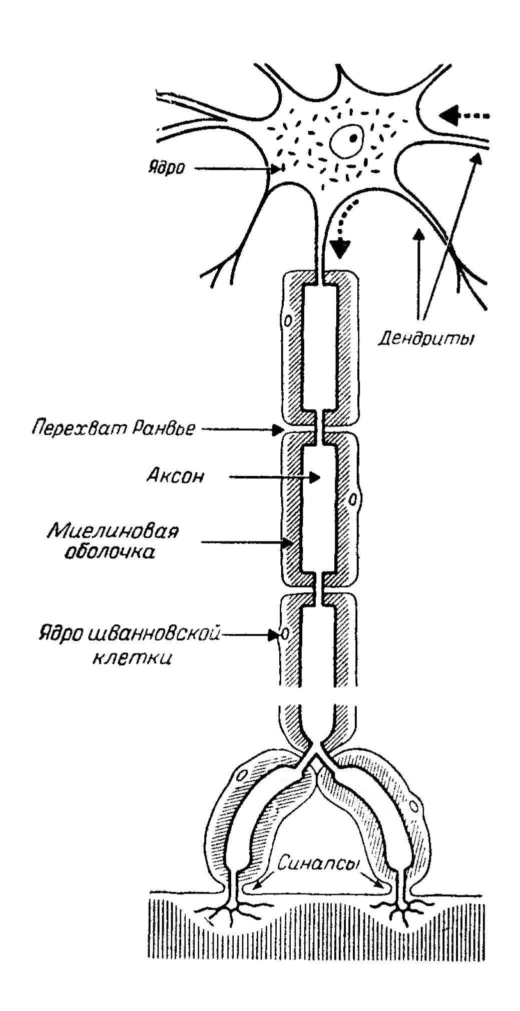


Рис. 14. Схема строения нейрона.

Нейрон состоит из тела и ветвящихся отростков, дендритов; длинный отросток, отходящий от тела, называется аксоном, он проводит нервные импульсы. Аксон покрыт миелиновой защитной оболочкой, которая выделяется шванновскими клетками. На оболочке видны перемычки — так называемые перехваты Ранвье.

Но в действительности осуществим лишь первый путь, потому что синапсы пропускают нервный импульс только в одном направлении (рис. 15). Почему?

Еще в 1788 году Гальвани в опытах с лапками лягушек обнаружил, а позже (в 1848 году) немецкий ученый Дюбуа-Реймон подтвердил своими экспериментами, что с феноменами нервной проводимости тесно связаны явления электрической активности. В 1923 году, применяя катодный осциллограф, Эрлангер и Гассер показали, что эта активность проявляется в виде циркуляции нервных импульсов в нервных

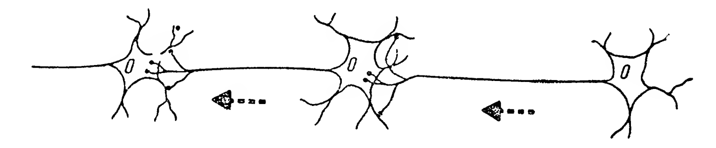


Рис. 15. В цепи нейронов связь между нейронами осуществляется при помощи синапсов, но без их непосредственного соединения с мембраной тела клетки.

волокнах. Современный уровень технического прогресса позволяет детально изучить эти импульсы при помощи микроэлектродов, представляющих собой тончайшие (диаметром менее тысячной доли миллиметра) капилляры, заполненные проводящей электричество жидкостью. Хотя эти электроды сравнительно прочны, они требуют деликатного обращения; их вводят в нервную сеть не вручную, а при помощи тончайших инструментов и при этом с такой точностью, что можно одновременно наблюдать, как показано на рис. 16, возникновение импульсов в теле нейрона *А*, а также в аксоне *Б*, который является выростом тела нейрона, и в пространстве *В*, непосредственно примыкающем к телу нейрона. Заметим кстати, что многочисленные сигналы типа *В* передают в окружающую среду суммарную электрическую активность мозга, которую можно наблюдать при помощи электроэнцефалографа. Нас интересуют чисто нервные сигналы типа *А* или *Б*. Они имеют форму импульсов силой в одну десятую вольта и продолжительностью около тысячной доли секунды.

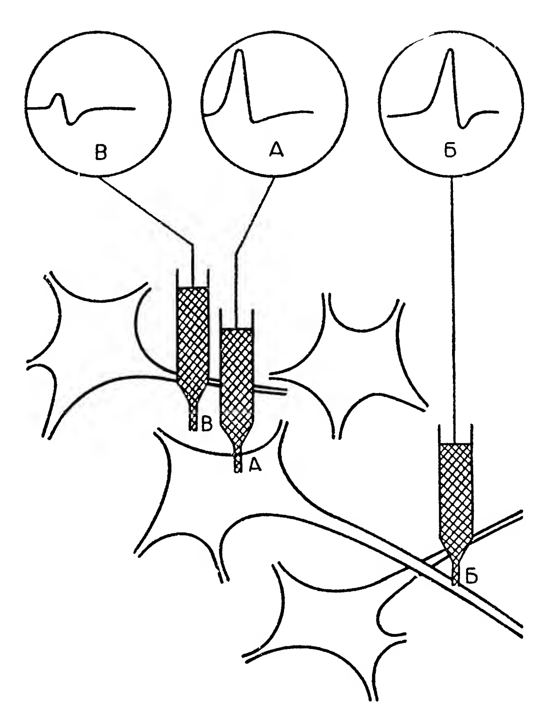


Рис. 16. Прохождение электрических сигналов в нервах.
Сигналы отводятся с помощью электродов, помещенных в тело нейрона (*А*), в аксон (*Б*) и в межклеточное пространство (*В*).

Эти импульсы передаются весьма своеобразным путем. В обычных проводниках, например в линиях электропередач, сигналы, проходя по кабелю, ослабляются, поэтому вдоль линии приходится располагать подстанции, усиливающие сигнал. Но импульс, проходящий по аксонам нервных клеток, вопреки этому закону не затухает, а сохраняет постоянную величину от начала и до конца пути. Кроме того, любое электронное реле, лампа или транзистор всегда, даже в нерабочем состоянии, потребляет некоторое количество энергии. А нейрон расходует энергию практически только на передачу импульса. Свойства нейрона поистине удивительны. Но не торопитесь копировать их — нужно сначала узнать, как работает нейрон. Сейчас нам уже многое известно. Для начала заме-

тим, что, если на нейрон подействовать анестезирующим веществом, он вообще теряет способность проводить что бы то ни было. Посланный при помощи микроэлектрода искусственный сигнал * угасает почти мгновенно. Значит, в аксоне должны быть усилители, периодически поддерживающие сигнал на определенном уровне. Долгое время ученые обращали внимание только на электрическую активность нервной системы. Но в последние годы положение резко изменилось, и теперь стало ясно, насколько важны химические механизмы, действующие на уровне синапсов и оболочек аксонов. Это открытие — результат тончайших экспериментов. Их невероятную сложность трудно даже вообразить. Ведь все эти процессы протекают или в мембране аксона, или в промежутке между концевым синапсом и телом следующего нейрона — в том и в другом случае на расстояниях, измеряемых стотысячными долями миллиметра! Посмотрим, что же происходит в оболочке аксона.

Нейрон — живая клетка, и поэтому он никогда не бывает статичным, инертным; для него характерна динамика, подвижность. Эта подвижность проявляется в разности концентраций некоторых химических веществ внутри и снаружи тела нейрона. И сам нейрон и окружающая его среда состоят из органических веществ и водных растворов солей, по составу напоминающих плазму крови. Вне клетки довольно много хлористого натрия; удается обнаружить и немного хлористого калия. Иными словами, там много натрия и мало калия. Внутри аксона, напротив, мало натрия и гораздо больше калия. По закону химического равновесия — это один из основных законов природы — натрий стремится диффундировать внутрь аксона из внешней среды, а калий — наоборот. Но хлориды натрия и калия находятся в водном растворе, и поэтому они частично диссоциированы на ионы, или, как говорят, ионизированы. В результате ионизации натрий и калий, с одной стороны, и хлор, с другой, несут электрические заряды. Эти заряженные частицы, называемые ионами, реагируют на изменение электрического

---

* Подразумевается раздражение нейрона одиночными импульсами электрического тока.

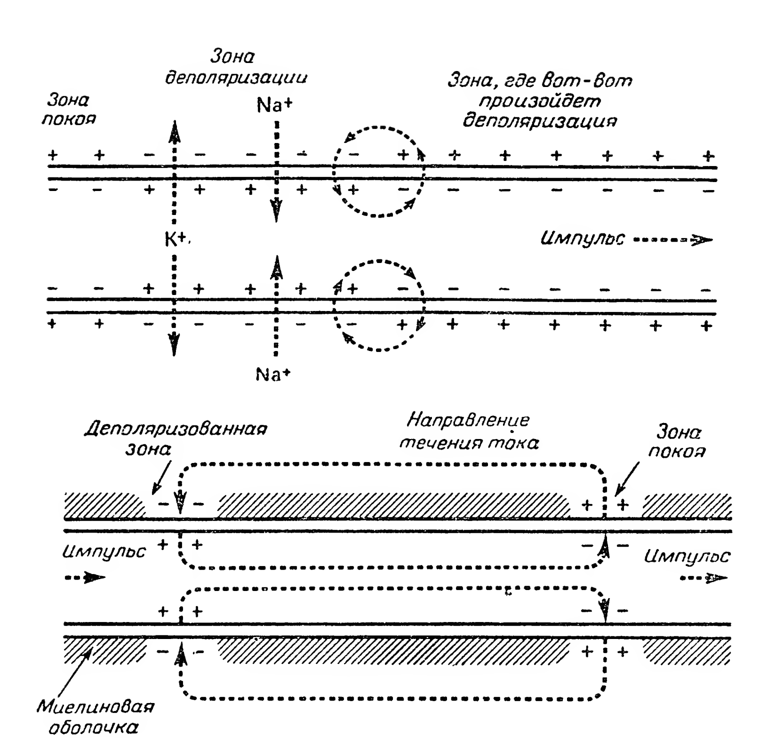


Рис. 17. Диаграмма, показывающая прохождение импульса по нерву.

Неравномерное распределение ионов создает разность потенциалов по обе стороны мембраны аксона. Когда нерв возбуждается, потенциал меняется от −70 *мв* до +40 *мв*. Под влиянием этого скачка потенциала ионы соседних областей в свою очередь приходят в движение; возникает течение тока. На нижней диаграмме — изолирующая миелиновая оболочка усиливает этот эффект течения тока вблизи перехватов Ранвье; таким образом уменьшаются потери и создаются благоприятные условия для передачи импульса от одного участка аксона к другому (скачком).

поля, или разности потенциалов. Таким образом, разность потенциалов между внутренней и внешней средой нейрона должна уравновешивать электрические заряды или некоторую разность концентраций внутри и снаружи нейрона. Иными словами, тело нейрона поляризовано по отношению к окружающей среде.

Эксперименты показали, что в состоянии покоя разность потенциалов между внутренней и внешней средой клетки, или поляризация, составляет примерно 70 милливольт. Чтобы сохранялось равновесие кон-

центраций ионов хлора внутри и снаружи клетки, необходима именно такая разность потенциалов; при этом внутри клетки обнаруживается отрицательный заряд, а снаружи — положительный (рис. 17). Но при разности потенциалов и концентраций ионов натрия и калия, наблюдаемой в покое, избыток натрия будет частично проникать из внешней среды в клетку, а избыток калия — из клетки наружу. Мембрана аксона, имея толщину всего около стотысячной доли миллиметра, обнаруживает под электронным микроскопом очень сложную структуру. Еще не выясненный химический механизм обеспечивает проникновение обратно во внешнюю среду ионов натрия, медленно диффундировавших внутрь клетки, и возвращает внутрь аксона ионы калия, диффундировавшие наружу. Таким образом в состоянии покоя по обе стороны клеточной мембраны поддерживается тончайшее динамическое равновесие концентраций ионов.

Что же происходит, когда какое-либо раздражение нарушает это равновесие? На рис. 17 такое нарушение представлено в виде участка с обратной поляризацией. Возникающий ток распространяется в обе стороны от места раздражения, что схематически показано стрелками, окружающими участок, который вот-вот будет деполяризован. Влияние возбужденного участка выражается в уменьшении разности потенциалов по обе стороны мембраны вблизи него. Разница в 30 милливольт кажется ничтожной, но она сосредоточена на поверхности, чрезвычайно малой по сравнению с толщиной самой мембраны. Поэтому здесь наблюдается мгновенный эффект огромной силы. Этой силы вполне достаточно, чтобы пустить в ход химические реакции. Мембрана, которая была почти непроницаема для ионов натрия, внезапно начинает их пропускать. Скорость процесса нарастает, в очень короткий промежуток времени знак зарядов меняется на обратный, и возникает новый нервный импульс впереди предыдущего. Этот процесс нельзя назвать передачей электрического заряда, это скорее продвижение вдоль нерва возбуждения, возникшего при локальной смене знака зарядов на противоположный. Но почему импульс передается только направо, а не налево, не в том направлении, откуда он пришел?

Иными словами, почему возникшее в аксоне возбуждение как бы продвигается само по себе, а не распространяется в обе стороны? Дело в том, что участок, по которому прошло возбуждение, на некоторое время становится невосприимчивым. Это время необходимо, чтобы восстановились химические вещества, принимавшие участие в изменении проницаемости оболочки аксона для ионов натрия.

Из всего сказанного ясно, что нервное волокно никак нельзя сравнивать с проводником электрического тока. Здесь нет заряженных частиц, передвигающихся в направлении тока. Электрические импульсы, которые, казалось бы, продвигаются по нервному волокну, на самом деле не что иное, как проявление локальных перемен знака ионных зарядов, которые в свою очередь порождают такие же перемены все дальше и дальше, создавая впечатление движения импульса. Таким образом, характеристики (в частности, сила и длительность) электрических сигналов, связанных с этими переменами, зависят только от природы среды, в которой распространяется возбуждение; именно поэтому длина аксона никак не влияет на импульс. Вторая важная особенность нервной проводимости — то, что прохождение импульса приводит к возникновению неактивной зоны. Чтобы по волокну прошли два импульса подряд, нужен некоторый перерыв между сигналами. Предельное число последовательных импульсов в секунду — 300. Фактически эта скорость бывает значительно меньше.

Нервные импульсы по своей природе подчиняются правилу «все или ничего». С тех пор как появились электронные вычислительные машины, где тоже циркулируют импульсы типа «все или ничего», появилась и склонность к совершенно неправомерным сравнениям: мозг — счетная машина, нейрон — отдельный ее элемент. В действительности это сходство весьма поверхностно, а вот различия глубоко принципиальны. Нейрон — не просто элемент счетной машины. Если еще можно найти какое-то сходство в передаче импульса по аксону, то уже на уровне синапсов это сходство бесследно исчезает. Вспомним, что между концевой бляшкой-синапсом и мембраной тела нейрона, к которому она подходит, нет никакой непосредствен-

ной связи. Как же происходит передача возбуждения, когда оно доходит до синапса?

Совсем недавно удалось объяснить чисто химическую природу этого процесса. Оказалось, что существуют синапсы двух типов: одни синапсы действуют позитивно, они способствуют возбуждению нейрона и облегчают появление нервного импульса; другие — негативно, они уменьшают возбудимость нейрона, делают его менее восприимчивым, или, как говорят, тормозят его. Необходимо сразу же отметить, что аксон каждого нейрона имеет синапсы только одного типа; здесь никогда не может быть путаницы между возбуждающим и тормозящим действием.

Синапсы не теряют своей активности и в покое, когда не получают сигналов через аксон, с которым они связаны. Группы (несколько тысяч) молекул определенного химического вещества (например, ацетилхолина) постоянно проникают через оболочки синапсов, и это беспорядочное проникновение напоминает явление шума. Молекулы оседают на мембране тела соседнего нейрона и меняют ее проницаемость. Затем в десятитысячные доли секунды все возвращается к прежнему динамическому равновесию. Подходя к синапсу, нервный импульс стимулирует появление молекулярных групп. Это приводит к тому, что в возбуждаемом (или тормозимом) нейроне изменяется средний уровень электрической поляризации; исходный уровень — 70 милливольт — понижается (или повышается — в случае торможения *). Если это падение достигло порогового значения, происходит то же, что мы уже видели на примере мембраны аксона, — процесс ускоряется и возникает нервный импульс. Наблюдается пространственное суммирование всех синаптических воздействий на нейроне, который получает возбуждающие и тормозящие влияния сразу от многих аксонов. Эти воздействия запоминаются лишь временно, так как деполяризующее и гиперполяризующее действие химических медиаторов, освобожденных синапсами, малоустойчиво. Теперь мы видим, что особенности распространения нервных импульсов по цепи нейронов определяются химическими процессами на

* Происходит гиперполяризация мембраны.

уровне синапсов. Импульс передается от синапсов к телу возбуждаемого нейрона, то есть в направлении движения молекул специфических веществ-посредников; передача в противоположном направлении принципиально невозможна.

Итак, нейрон не простое сигнальное реле, это орган, который обрабатывает полученную информацию и обладает своеобразной кратковременной памятью. Чтобы представить себе всю сложность операций, которые может производить крупный двигательный нейрон, достаточно сказать, что он получает сигналы одновременно от десятков тысяч возбуждающих и тормозящих синапсов. При этом не следует думать, что связи в сети нейронов напоминают линейные, то есть что сигнал от чувствительной клетки проходит по прямой линии нейронов. Это вовсе не так: нейроны всегда действуют друг на друга возбуждающим или тормозящим образом. Разберем простой пример рефлекторного движения. Если на кожу действует раздражитель, укол булавки, рука немедленно отдергивается вследствие сокращения мышц. Это движение обусловлено чувствительным и двигательным нейронами. Но в самих мышцах есть датчики скорости движения, которые действуют по принципу обратной связи и тормозят непосредственную реакцию.

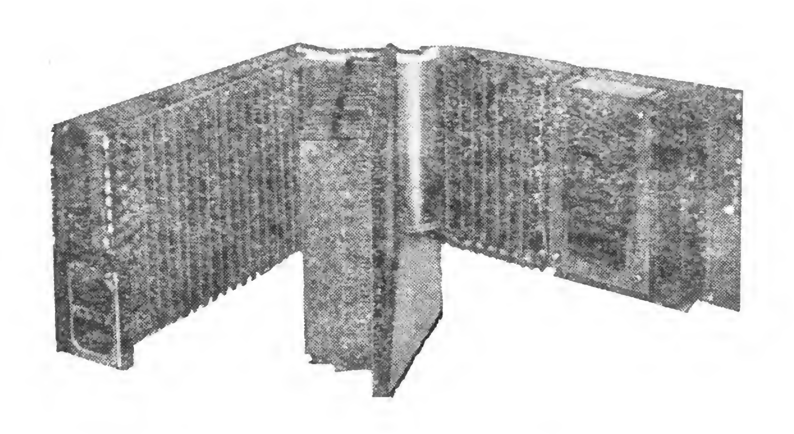
Явления, наблюдаемые на элементарном уровне, становятся все более убедительными по мере того, как мы переходим к более сложным ощущениям. Любая чувственная информация распространяется двумя путями: специфическим и неспецифическим. Специфический путь ведет к центрам в коре мозга, где сигнал подвергается анализу и откуда исходит руководство к действию. Неспецифический путь приводит к так называемым «подкорковым» центрам, где происходит общий анализ, результат которого действует тормозящим или возбуждающим образом на путь сознательного анализа. Оба пути — специфический и неспецифический — даже отдаленно не напоминают линейную цепь реле; напротив, они одновременно дивергентны и конвергентны и на всех ступенях имеют многочисленные петли обратной связи, которые оказывают тормозящее или возбуждающее влияние.

Нервная система настолько сложна, что не удивительно, если исследование всех ее функций покажется совершенно безнадежным делом. Не нашла подхода к ее изучению и современная математика. Она развивалась одновременно и параллельно с физикой, а затем распалась на прикладную и чистую математику. Чистая математика отделилась от прикладной в процессе абстрагирования. Но как бы сложны ни были физические системы, они в общем довольно просты, биологические системы бесконечно сложнее. Нервная система человека состоит из десятков миллиардов нейронов, несущих строго определенные функции! Поэтому нет ничего странного в том, что математика еще не приспособилась к биологическим системам. Необходима новая отрасль прикладной математики, чтобы обеспечить создание машин, подобных человеческому мозгу. А пока что нужно как можно лучше использовать имеющийся математический аппарат; может быть, стоит работать методом последовательного приближения: создать модель, испытать ее, сравнить с данными эксперимента, усовершенствовать и повторять этот процесс снова и снова.

МОДЕЛИ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ

Для работы необходимы модели, и поэтому не удивительно появление огромного количества трудов, посвященных созданию искусственных нейронов и нервных сетей. Можно ли сконструировать искусственные нейроны? Да, и многие модели уже построены. Одна из первых моделей, модель доктора Хармона, сотрудника фирмы „Белл“, состояла из четырех транзисторов, десятка сопротивлений и пары конденсаторов. Генерируемые сигналы обычно похожи на свои биологические эквиваленты.

Компонуя большое количество таких нейронов, можно создать сложные сети, способные производить алгебраические и логические операции. Но стоит ли пытаться создать точную копию? Может быть, это далеко не лучшее решение. Машина, состоящая из «сети искусственных нейронов», не дает никаких преимуществ по сравнению с классическими счетно-решающими устройствами. Ее работа интересует кибернетиков



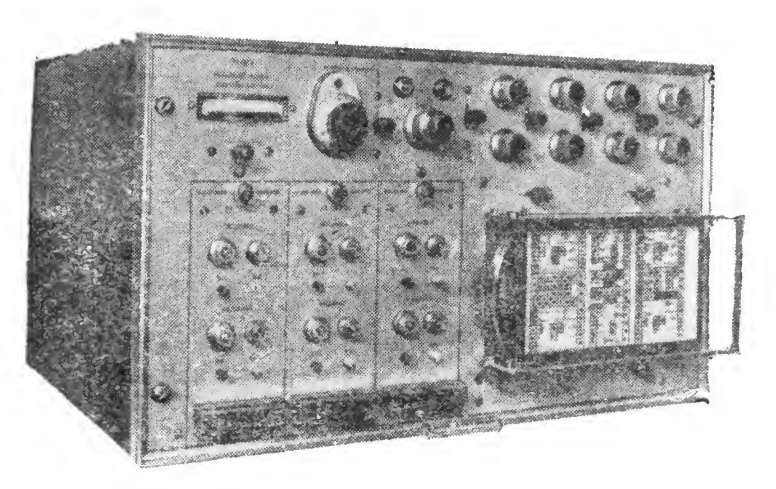


Рис. 18. Цифровая (вверху) и аналоговая (внизу) вычислительные машины.

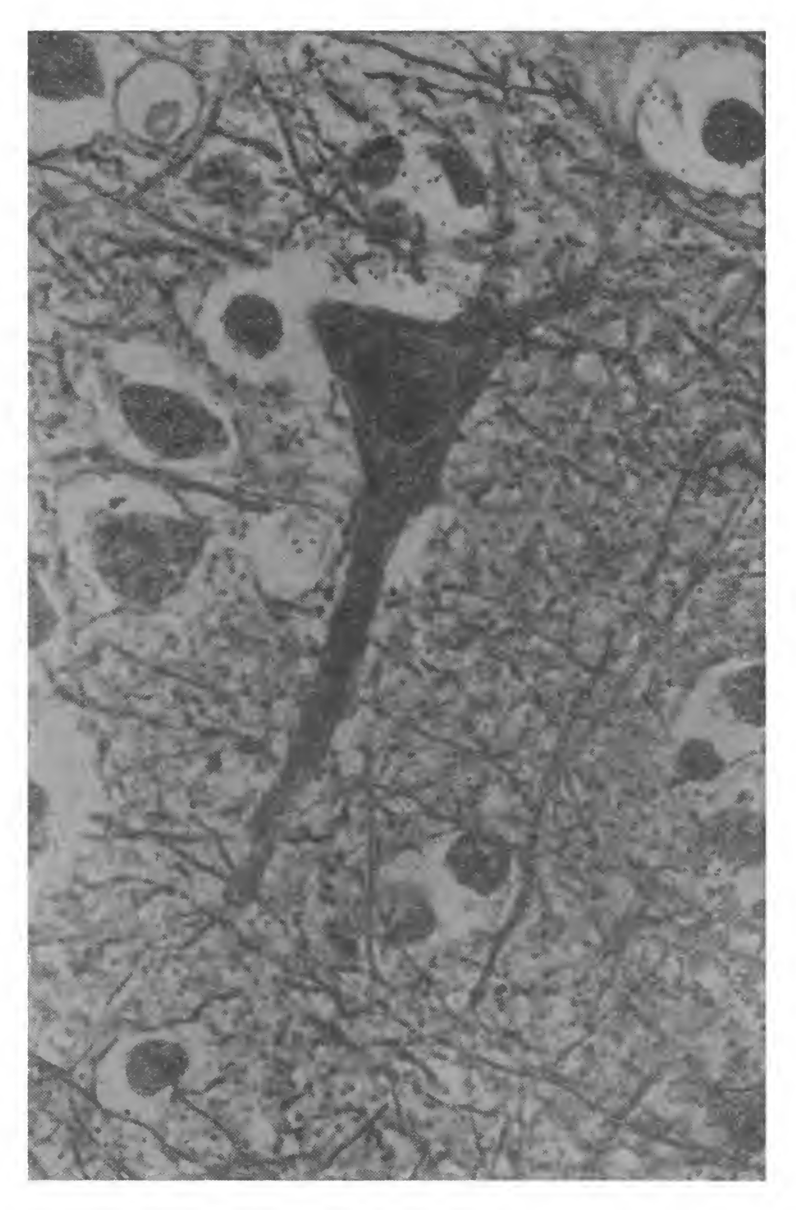


Рис. 19. Микрофотография нервных клеток коры головного мозга.

только потому, что она объясняет функции нейронов (создана даже новая подчиненная наука-перекресток — нейрокибернетика). Для бионики такая машина не очень ценное приобретение, так как в ней слишком мало отдельных элементов и ее работа даже отдаленно не может напоминать работу миллиардов нейронов человеческого мозга.

Вспомним еще раз, что, хотя появление точных копий в бионике вполне закономерно, ученый-бионик всегда оставляет за собой право подойти к проблеме с другой стороны, взяв за основу только некоторые общие идеи, важнейшие особенности природных прототипов. Для инженера нейрон интересен тем, что его особенности позволяют передавать по длинной линии импульс, возникающий в каждый данный момент в локальном источнике энергии, причем форма этого импульса не зависит от сигнала-раздражителя, а связана только с характеристиками передающей линии. Основные механизмы имеют химическую (ионную) природу, и поэтому скорость передачи импульса относительно невелика (максимум 100 метров в секунду). Такой ионный механизм — единственно возможное решение для живой клетки, где электрические потенциалы должны быть слабыми, чтобы не нарушить целостность сложных молекул, составляющих клетку. В машине вместо ионов можно использовать электроны, и это даст значительное преимущество в скорости, потому что электроны гораздо менее инертны, чем ионы.

НЕЙРИСТОРЫ

В 1960 году Хьюитт Крейн предложил устройства, которые он назвал нейристорами. Они отличаются способностью передавать импульс без затухания, причем характеристики импульса зависят только от свойств линии передач и не связаны с изменениями исходного сигнала. Точнее, передается не сигнал, а зона возбуждения, которая перемещается по линии как бы сама по себе. За этой зоной идет зона пониженной возбудимости, которая не пропускает импульсов, следующих непосредственно за предыдущим. Первые нейристоры работали на простых электромехани-

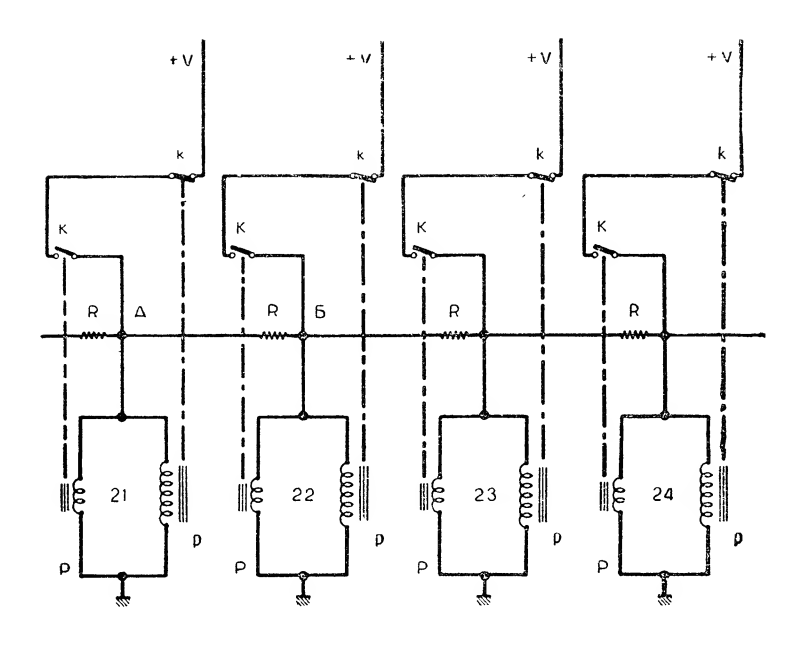


Рис. 20. Нейристор Крейна.

Возбуждение *А* продвигается вдоль цепи реле, как только срабатывает реле *Р* в ячейке 21.

Р — быстродействующее реле с переключателем *К*, разомкнутым в состоянии покоя; *р* — медленное реле с контактом *к*, замкнутым в состоянии покоя; *R* — сопротивление в цепи, *V* — источник питания

ческих реле — сотни тысяч таких реле используются в телефонной сети. Реле является электромагнитом, в котором при прохождении тока через катушку притягивается небольшой стальной стержень — якорь. Это движение замыкает или размыкает контакты переключателей. Как показано на рис. 20, нейристор можно собрать из множества реле, расположенных попарно. Для упрощения схемы изображена только часть приборов, состоящая из четырех ячеек: 21, 22, 23 и 24. Спаренные реле отличаются друг от друга: одно (*Р*) срабатывает очень быстро и немедленно реагирует на появление тока в катушке, а другое (*р*) реагирует медленно и срабатывает только через некоторое время, так как его действие замедляется специальными приспособлениями. Это дает верную

картину явлений, происходящих в аксоне: быстродействующие реле (*P*) имитируют проникновение ионов натрия в клетку, а медленные (*p*) — восстановление равновесия под действием ионов калия.

В состоянии покоя катушки спаренных реле не соединяются с источником тока (*V*). Что происходит, когда в цепи возникает электрическое возбуждение, например возрастает потенциал на обмотках реле в ячейке 21? Наступает момент, когда потенциал увеличивается настолько, что этого достаточно для замыкания быстродействующего реле (*P*); тогда напряжение *V* прилагается непосредственно к концам обмоток реле этой ячейки. Но величина *V* гораздо больше той, при которой срабатывают реле *P*. Напряжение *V*, приложенное к *A*, через сопротивление *R* передается в *Б*, в ячейке 22 возрастает напряжение и повторяется тот же процесс, который мы наблюдали в ячейке 21: реле *P* замыкаются одно за другим до конца цепи. Именно так действует натрий в оболочке аксона. Но не бездействуют и медленные реле. Вернемся к ячейке 21. При замыкании реле *P* напряжение на концах обмотки *p* резко возрастает; реле *p* приходит в действие и через некоторое время срабатывает, прерывая контакт с источником тока. В результате оба реле (*P* и *p*) возвращаются в состояние покоя, *P* — быстро, а *p* — медленно. Если в этот момент в сети возникнет возбуждение, ничего не произойдет до тех пор, пока реле *p* не возвратится в состояние покоя и тем самым не восстановит возможность контакта с источником энергии. В этом случае наблюдается такой же период восстановления, как и в аксоне нервной клетки.

Но это слишком сложная структура, скажете вы, а электромагнитные реле чересчур медленно работают. Верно, но главное достоинство этого прибора заключалось в том, что он доказал бесконечное богатство возможностей, которое открывает применение нейристоров в счетно-решающих устройствах. Сейчас есть уже более совершенные варианты таких приборов, созданные А. Коутом в лабораториях Морского ведомства США. Нейристор стал миниатюрной пластинкой из полупроводниковых материалов (сходные материалы встречаются в транзисторах) длиной не

более сантиметра. Толщина его рабочего участка всего две сотых миллиметра. Возможно, такие элементы войдут в состав новых машин-гигантов, состоящих из миллионов нейристоров.

Счетно-решающие устройства на нейристорах, копируя функцию нервной системы, не имитируют сеть нейронов. Но основная идея, возникшая в процессе изучения нервной системы, это чисто динамическая передача импульса. Нейристорные машины можно рассматривать как пример двойного приложения бионики: во-первых, отдельный элемент, нейристор, является копией природного объекта; во-вторых, компоновка этих основных элементов в сложной сети счетной машины основана на идее динамического функционирования, создана по образу и подобию нервной системы. Есть одно неизбежное следствие такого динамического характера нейристорной машины: нельзя определить ее состояние в каждый данный момент. В классических электронно-вычислительных машинах для этого достаточно остановить генератор синхронизирующих сигналов. А в нейристорных устройствах моменты времени определяются не специальным генератором сигналов, а скоростью распространения возбуждения по цепи.

Кажется удивительным, что сложные расчеты можно производить посредством передачи возбуждения в сети. В 1962 году Х. Крейн доказал, что это возможно благодаря особым свойствам нейристоров. Например, посланные навстречу друг другу раздражения взаимно уничтожатся, так как за каждым из них следует неактивная область восстановления. Схематически это явление можно объяснить на примере соединения типа *R*, как назвал его Крейн (рис. 21, *а*). Два проводника (*1* и *2*) имеют участок с общим входом (центральная часть). Эта общая зона не мешает прохождению импульса по проводникам *1* и *2* в отдельности.

Но если импульсы, идущие слева (*1*) и справа (*2*), встречаются в общей зоне, они гасят друг друга, как это происходит при их столкновении в одном проводнике. Вторая существенная деталь — соединение типа *Т* (рис. 21, *б*); в точке *N* проводник *1* раздваивается на проводники *2* и *3*. Импульс, посланный по

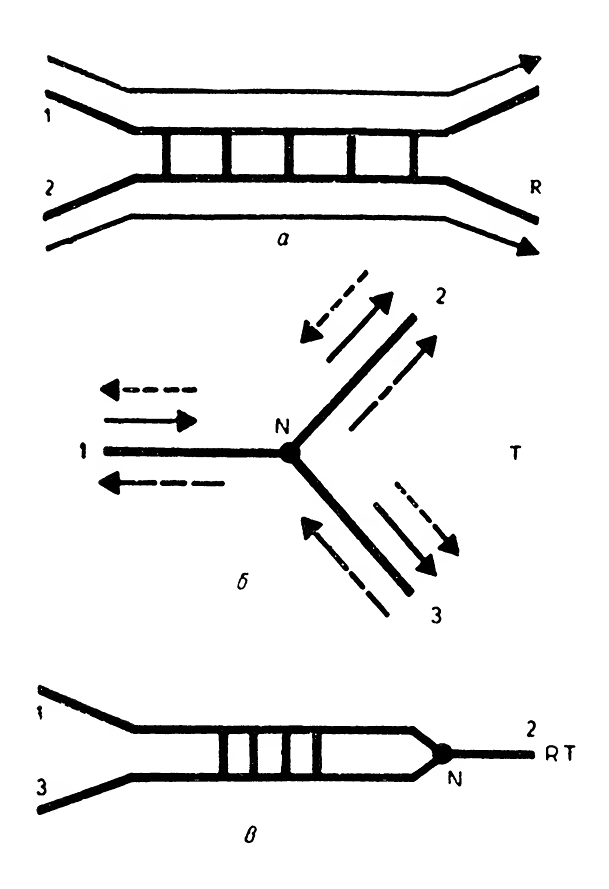


Рис. 21. Три типа составных элементов нейристорных устройств (по Х. Крейну).

1 направо, делится в точке *N* на два идентичных импульса, двигающихся по проводникам *2* и *3*. Эта фигура совершенно симметрична, и любой из трех проводников соединения типа *T* может служить входом. Нейронная сеть пропускает импульс только в одном направлении, так как синапсы имеют одностороннюю проводимость. Эту особенность можно моделировать, совмещая соединения типа *R* и типа *T* (рис. 21, *в*). В соединении типа *RT* возбуждение, поступающее в

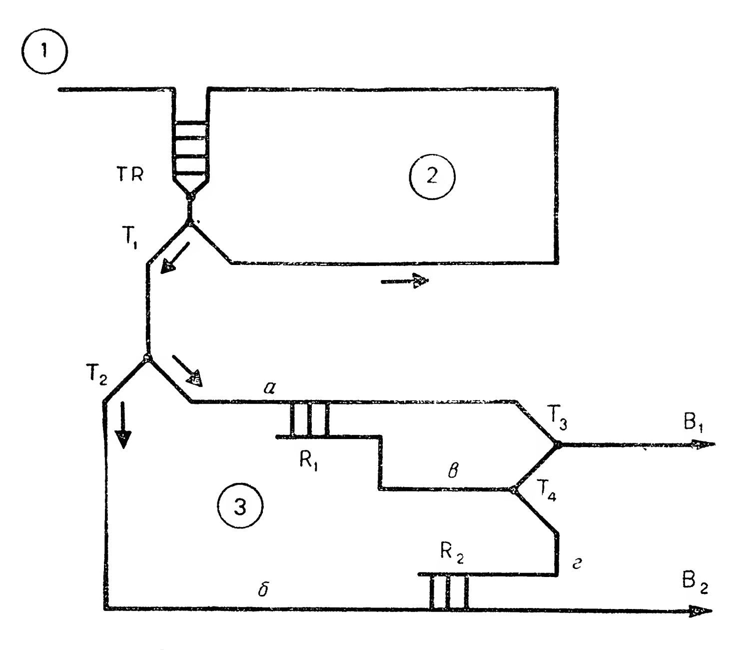


Рис. 22. Схема «качелей» на нейристорах (по Х. Крейну).
1 — основной вход; *2* — кольцо с замкнутой циркуляцией; *3* — устройство, подобное «качелям».

проводник *1*, проходит общую зону и разделяется в точке *N*. Оно не встречает препятствий в продвижении направо (в направлении *2*), но не может вернуться налево (в направлении *3*), так как общая зона в этот момент не проводит возбуждения.

Показать, как эти элементы можно скомбинировать в вычислительной машине, слишком сложно, да это и не входит в задачи данной главы. Но для заинтересовавшихся читателей одного примера будет вполне достаточно. Это «качели» (триггер) *. Как по-

---

* Так называемые качели Эккле-Журдана реализуются путем спаривания триодов таким образом, что напряжение на сетке одного управляется анодным током другого, и наоборот. Поэтому каждая такая пара имеет всего два устойчивых состояния. Схема работает по принципу «да» или «нет», и ток либо проходит, либо не проходит.

казывает название, этот электронный прибор при получении сигнала на входе «перескакивает» из исходного состояния (*А*) в другое состояние (*Б*). Наиболее распространенная модель в счетных устройствах называется «бистейбл» (двоякоустойчивая), в ней состояния *А* и *Б* одинаково стабильны и отрегулированы так, что если первый сигнал переводит модель из состояния *А* в состояние *Б*, то следующий сигнал заставляет ее возвращаться из состояния *Б* в состояние *А*.

Итак, сигналы, поданные на вход качелей с определенной частотой, появляются на выходе *А* с частотой вдвое меньше исходной. Это позволяет производить арифметические действия.

На рис. 22 показан пример качелей на нейристорах с использованием соединений *R*, *T* и *TR*. Исходный сигнал, поданный на вход (*1*), приводит через соединение *TR* в возбуждение замкнутую петлю (*2*). Импульс, поданный на эту петлю, циркулирует в ней непрерывно. Таким образом, петля действует как маятник.

При каждом взмахе маятника импульс, не затухая, раздваивается на T_1, а затем на T_2 по направлению к двум проводникам *а* и *б*, которые имеют выходы B_1 и B_2. Однако эти выходы тормозят друг друга, так как перед ними расположены реактивные пути *в* и *г* и стыки R_1 и R_2. Предположим, что возбуждение от сигнала, введенного в прибор, достигло выхода B_1. По пути оно доходит по проводнику *г* до стыка R_2, где сталкивается с возбуждением, которое прошло по линии *б*, и они гасят друг друга. Следовательно, при наличии сигнала на выходе B_1 на другом выходе B_2 сигнал отсутствует. А то возбуждение, которое прошло на B_1, возвращается по пути *в* к стыку R_1, где сталкивается с возбуждением следующего цикла, которое идет по пути *а*. Они оба угасают, и во втором цикле на выходе B_1 сигнала не будет. Возбуждение, которое циркулировало по *б*, приходит без помех на выход B_2, и процесс повторяется. Следует подбирать такую длину проводников нейристора, чтобы динамические столкновения возникали в точно определенные моменты времени.

Динамические особенности, присущие нейристорным устройствам, сами по себе не могут объяснить поведение этих машин. Но именно активная динамическая функция в десятки раз повышает эффективность нейристорной вычислительной машины, потому что каждый отдельный ее элемент может последовательно участвовать в различных операциях, так же как и отдельный нейрон в нервной системе.

ГЛАВА 5

МИРЫ ЧУВСТВ

ВЛИЯНИЕ ЧУВСТВ НА ПОВЕДЕНИЕ

Ни одно живое существо нельзя считать совершенно автономной системой, замкнутой в самой себе. Напротив, оно находится в постоянном и активном взаимодействии с окружающей средой. Оно непрерывно подвергается воздействию внешней среды, принимая ежеминутно сотни внешних раздражений. Внезапное прекращение потока ощущений, который проникает в живое существо через органы чувств, может иметь самые серьезные последствия. Новейшие исследования показывают, что у человека, полностью изолированного от внешней среды, появляются признаки психического расстройства: он теряет представление о времени, ему начинает казаться, например, что его голова распухает или уменьшается, а то и вовсе отделяется от тела, затем начинаются галлюцинации. И если эксперимент продолжать, то не исключена вероятность, что он приведет к безумию.

Ощущения — это не просто роскошь, без которой можно обойтись, они составляют существенную и неотъемлемую часть живого существа. Если мы считаем, что необходимо питаться, чтобы снабжать наши клетки энергией, то еще более важно обеспечить постоянный приток ощущений для нашей нервной системы. Каждое животное среди неисчерпаемого разнообразия пищи находит наиболее приемлемую для себя: овца не ест мяса, а хищник недолго протянет, если его кормить травой. То же самое наблюдается и в мире чувств: органы чувств животных обладают высокой избирательностью, они принимают только ту информацию, которая существенна для жизни и сохранения данного вида. В общем можно без преувеличения сказать, что органы чувств каждого существа создают его собственный мир внутри обитаемой Вселенной.

Можно подумать, что мир вокруг нас одинаков для всех населяющих его живых существ. Это далеко

не так*. Конечно, невозможно поменяться местами с животным и точно узнать, как выглядит его мир. Но есть возможность приблизиться к пониманию этого мира, внимательно наблюдая поведение животных и подвергая его тщательному физиологическому анализу.

Перенесемся мысленно на цветущий летний луг. Вселенная муравья очень мала: всего несколько тропинок, проложенных от муравейника к местам добывания пищи. По этим тропинкам муравьи постоянно бегают туда и обратно, и мы замечаем, что иногда они как бы ощупывают или пробуют землю усиками. Муравьи практически ничего не видят, и это понятно: к чему им зрение в вечной тьме подземных галерей? Но природа нашла другое чувство, одинаково эффективное и днем и ночью. Это чувство — обоняние. Муравьиные тропы представляют собой прежде всего пахучие дороги, поэтому муравьи и «ощупывают» путь перед собой. Человеку трудно вообразить себе мир, состоящий из запахов, потому что наше обоняние развито очень слабо. Но один из верных спутников человека, собака, тоже живет в мире запахов. Человек узнает своих друзей по чертам лица, а собака узнает хозяев по комплексу запахов. Надо сказать, это этот комплекс столь же индивидуален и обладает такими же тонкими различиями, как для нас — черты лица. Собака, все время принюхиваясь, видит при этом довольно плохо, не больше, чем нужно, чтобы разглядеть землю, по которой она бежит. При этом она даже не различает цвета (из всех млекопитающих эта привилегия дарована только человеку и обезьяне). Видимый мир собаки очень беден и похож на черно-белый фильм, но он играет всего-навсего второстепенную роль. Главное в ее мире — запахи.

Картина переменится, если мы обратим внимание не на муравья, а на лягушку, живущую на берегу ручья. Мир лягушки — зримый, как и мир человека. Но между этими мирами нет ничего общего. Лягушка не видит пестрых цветов, покрывающих луг. Однако

---

* Речь идет только о различном восприятии внешнего мира.

стоит мухе попасться ей на глаза — она ее не прозевает. Чтобы что-то рассмотреть, человек должен направить свой взгляд в эту сторону, потому что у человека поле отчетливого видения ограничено. У лягушки все наоборот: видит она плохо, но зато она плохо видит в пределах очень широкого поля зрения. Она замечает только быстро перемещающиеся объекты. Если такой объект слишком велик и его нельзя съесть, решение одно — бегство. Цветовое зрение у лягушки несовершенно, но достаточно развито, чтобы отличить голубую воду, которая сулит ей безопасность, от зеленой травы. Часто говорят, что лягушка, которая смотрит на скользящего к ней ужа и не двигается с места, «зачарована» змеей. Все гораздо проще. Лягушка не спасается бегством только потому, что не видит медленно подползающую змею.

Пчелы, перелетающие с цветка на цветок, тоже живут в видимом мире. Для чего им зрение? Чтобы узнать на большом расстоянии те цветы, с которых они собирают нектар и пыльцу. Видимый мир пчелы не похож ни на мир лягушки, ни на мир человека. Для пчелы весь луг — только цветы, но эти цветы она видит сложным глазом, чувствительным к поляризованному свету.

Различать цветы — значит различать цвета. Пчела различает цвета, но не так, как человек. Ее глаз не видит красного цвета, но зато чувствителен к ультрафиолетовым лучам, которых мы не воспринимаем. Изучение поведения пчел показывает, что они предпочитают полосатые или пятнистые поверхности, напоминающие лепестки цветов. Очевидно, пчела не видит ни бутонов, ни опавших цветов, потому что ни те, ни другие ей не нужны. Но венчики цветущих растений ярко светятся, приманивая ее, полосы на лепестках рельефно выступают в поляризованном свете, а середина сверкает в ультрафиолетовых лучах солнца.

И птица, летающая в небе, тоже живет в мире преимущественно зримом. Но это снова другой, особый мир, не похожий на наш. Как видите, нам приходится привыкать к мысли, что одно и то же чувство, например зрение, может служить разным существам совершенно по-разному, разделяя видимый мир на отдельные миры. И чем больше различаются два вида

по образу жизни, тем более непохож мир чувств одного на мир чувств другого. Многие птицы — превосходные летуны; значит, им нужно видеть как можно дальше, а если так, то они должны иметь очень острое зрение.

Известный пример — хищные птицы, которые кружат в небе, выискивая добычу на земле и, заметив мышь или кролика, пикируют с высоты и без промаха настигают жертву. Птицы хорошо различают цвета; цвет, очевидно, помогает им воспринимать рельеф. Проблема восприятия рельефа вызывала много споров: можно ли объяснить это явление только бинокулярным зрением? Ведь известно, что человек различает рельеф на цветном изображении гораздо лучше, чем на черно-белом. Каждый глаз птицы в отличие от глаза человека имеет своё отдельное поле зрения — у птиц глаза расположены по бокам головы. Самая поразительная в этом смысле птица — бекас, у которого каждый глаз видит больше половины горизонта. Поэтому одним бинокулярным зрением нельзя объяснить, как происходит восприятие рельефа. Должно быть, цвет играет главную роль в этом восприятии.

Мир зрения, мир запаха... А нет ли других возможностей чувственного анализа мира? Разумеется, есть; разнообразие чувств почти безгранично. Представим себе тот же луг поздним вечером; все затихает. Но летучие мыши, преследующие в темноте комаров и бабочек, живут в мире резких криков, недоступных нашему слуху.

На этом можно было бы остановиться. Нам уже ясно, что даже на маленьком участке земли, в одинаковых условиях мы встречаем различные миры чувств. Каждый вид получает свою, специфическую информацию, жизненно ему необходимую. Этих различных миров столько же, сколько видов, обитающих на Земле.

Чем выше развитие данной формы жизни, тем разнообразнее ее жизненные потребности и тем более развиты должны быть ее чувства. Но совершенствовались ли чувства по мере развития определенной формы жизни, или эта форма жизни достигла высокого совершенства потому, что ей были присущи высокоразви-

тые чувства? На этот вопрос, по-видимому, очень трудно ответить: слишком переплелись эти понятия за два миллиарда лет существования жизни на Земле.

ИСКУССТВЕННОЕ ДОПОЛНЕНИЕ ПРИРОДНЫХ ЧУВСТВ

Оставляя другим решение этой проблемы, бионик обратит внимание только на вывод: чувства, присущие данному виду, выделяют тот мир, в котором он живет. Каждое новое приобретение в процессе эволюции — более совершенные органы чувств или совсем новые чувства — расширяет этот мир. Особенно это верно по отношению к человеку — разум позволяет ему быстро добиться того, что очень медленно появляется в процессе эволюции и естественного отбора. Расширение мира чувств человека происходит взрывообразно, напоминая цепную реакцию, потому что каждое достижение в этом мире порождает новые идеи, которые создают плацдарм для новых завоеваний. С давних времен человек старался только расширить поле действия своих природных чувств, как бы наращивая их. Это легло в основу современных завоеваний науки, начало которым положило изобретение подзорной трубы и микроскопа: метафизические рассуждения о строении мира и его законах уступили место исследованию иного, незнакомого мира. Но человек не остановился на усовершенствовании своих природных чувств — он овладел новыми чувствами. Он открыл чудесный мир электрона и электромагнитных волн. Несомненно, самое важное последствие этого открытия — появление усилителя, сначала лампового, а в наше время — транзисторного. Усилитель буквально совершил переворот в современной науке. Любое физическое явление — звук, ультразвук, свет, тепловое излучение, температуру, давление, движение, скорость, ускорение, плотность тела, движение частиц атома — стало возможно преобразовать в электрические сигналы усилителя и приемника.

Приведем несколько примеров. Каждый знает микрофон в телефонной трубке, который трансформи-

рует звуки речи в низкочастотные сигналы; пьезоэлектрический кристалл кварца чувствителен к давлению и преобразует его в электрические сигналы, пропорциональные по силе; по изменению электрического сопротивления металлической нити измеряют температуру; скорость машины может быть измерена при помощи связанного с колесом динамо, в котором возникает электрическое напряжение, пропорциональное скорости машины. Иногда сигнал в преобразователе очень слаб, но как бы слаб он ни был, его всегда можно усилить, сравнить с другими сигналами, подвергнуть обработке на вычислительных машинах и окончательно оформить в виде выводов и законов, которые расширяют пределы наших знаний. Но во многих областях уже достигнута граница чувствительности — та самая граница, за которой шум мешает воспринимать сигналы. Ее можно перешагнуть; единственный путь к этому — глубокое охлаждение приемника и входа связанного с ним усилителя. Именно поэтому усилители радиотелескопов — гигантских антенн, улавливающих сигналы отдаленных галактик, — представляют собой мазеры, взвешенные в жидком гелии, температура которого близка к абсолютному нулю.

Самое удивительное то, что в природных органах чувств мы не находим никаких усилителей. Разнообразие клеток на входах рецепторов почти бесконечно, и на первый взгляд оно обескураживает, потому что, казалось бы, должно повлечь за собой бесчисленные варианты структур и организации. Но изучение передачи сигналов в нервной системе показало, что в действительности за этим видимым разнообразием скрыто принципиальное единство, так как в нервной системе функционируют только сигналы определенного рода, и это касается всех живых существ, на каком бы уровне развития они ни находились. Так же как современная наука старается преобразовать все физические явления в электрические сигналы, которые легко поддаются обработке, все чувствительные клетки любого рода преобразуют полученное раздражение — независимо от его характера — в серию нервных импульсов.

Форма импульса не может нести информацию, потому что, как мы уже знаем, она зависит только от

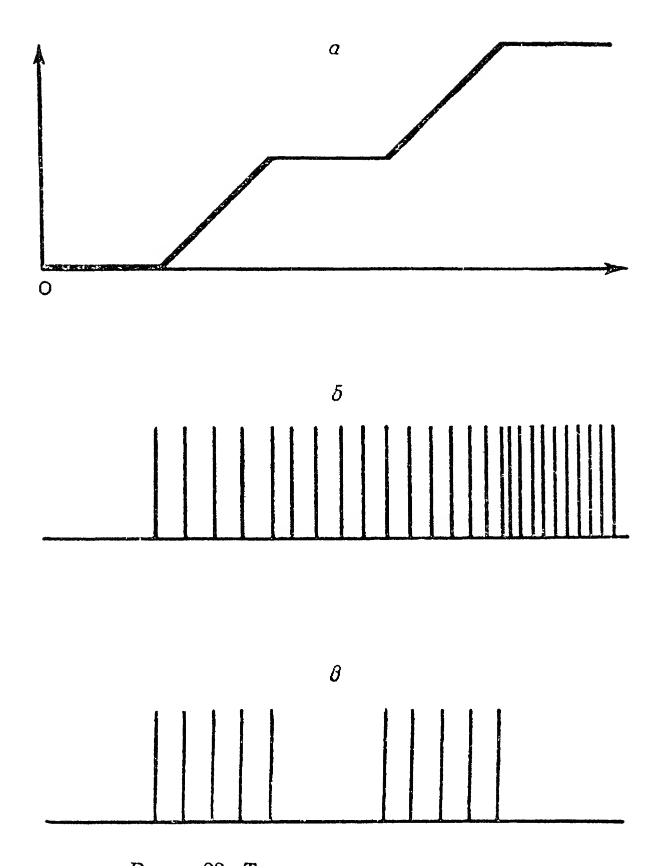


Рис. 23. Типы сенсорных ответов.
а — раздражение; *б* — ответ позиционный (тонический), *в* — ответ скоростной (фазический).

характеристик передающего импульс аксона. Единственная переменная, которая может переносить информацию, — это частота серий импульсов. Модуляции частот могут проявляться в двух разных формах.

Первый, более простой случай — когда частота меняется пропорционально интенсивности раздражителя. Как видно на рис. 23, частота импульсов (*б*) возрастает по мере усиления стимула (*а*). Инженер назвал бы ее позиционной информацией, а биолог — тоническим сигналом (не удивительно, что специали-

сты порой не понимают друг друга: у каждого из них свой специфический язык, и получается, что одно и то же явление они называют по-разному). Еще в середине XIX столетия, после работ Вебера, психологи установили, что всякое ощущение пропорционально не силе раздражителя, а ее логарифму. Что это значит? Предположим, что субъект получил раздражение определенной силы, которую можно принять за 100, и экспериментатор хочет определить, как нужно изменить силу этого раздражения, чтобы два последовательных стимула 100 и $(100 + x)$ четко различались как отдельные ощущения. Предположим, что x равен 10 процентам. Оказывается, именно скачок на 10 процентов наблюдается в любом случае, каков бы ни был уровень раздражителей — сильный это раздражитель или слабый.

В нашем случае, чтобы два стимула хорошо различались, их сила должна соответствовать 10 и 11, 100 и 110, 1000 и 1100. Другими словами, уловимое различие в ощущении зависит не от абсолютной величины изменения раздражителя, а от величины относительной и равно отношению абсолютной величины изменения к абсолютной силе раздражителя. Надлежащая математическая обработка результатов этого открытия привела к логарифмическому закону Вебера.

АККОМОДАЦИЯ И РОЛЬ УСИЛИТЕЛЕЙ

Вполне естественно, что для того, чтобы совершить какое-то действие по отношению к внешней среде, нужно учитывать не абсолютные, а относительные изменения этой среды. Но здесь возникает серьезное затруднение: средняя сила раздражителя может варьировать в очень широких пределах, а чувствительная клетка, которая реагирует «позиционно», имеет весьма ограниченный выбор реакций. Наибольшая возможная частота нервных импульсов, зависящая от характеристик проводящего нейрона, как мы уже знаем, не превышает 300 импульсов в секунду. Чтобы появилось ощущение, раздражитель должен действовать очень короткое время, менее секунды. Предположим, что решения, принимаемые мозгом, зависят от числа

сигналов в секунду. Тогда максимально широкая гамма вариаций силы раздражителей простирается от 1 до 300.

А ведь колебания силы света от глубокой ночи до солнечного полудня измеряются не сотнями, а миллионами единиц. Так же резко отличается безмолвие пустыни от рева моторов самолета. Какое приспособление дает нервной клетке возможность так

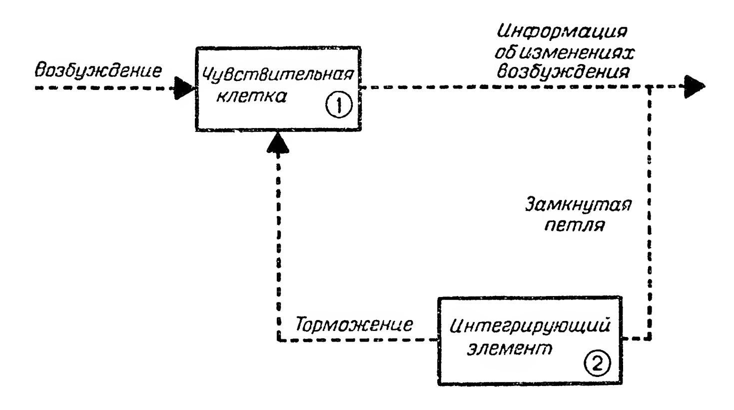


Рис. 24. Феномен аккомодации объясняется на примере системы контроля с переменными параметрами. Сигнал на выходе сравнивается в памяти со средним сигналом. Часть его после интеграции подается на вход по петле обратной связи и оказывает действие на передаточную функцию.

широко раздвинуть границы восприятия? Это — явление аккомодации, которое позволяет перейти от «позиционной» реакции к реакции «скоростной», или, на языке биологов, от тонической реакции к фазической. Клетка реагирует не на силу раздражителя, а на изменения этой силы. Рис. 23, *в* демонстрирует огромную разницу между этими двумя типами поведения и доказывает преимущества аккомодации. Что же здесь происходит? Механизм аккомодации можно объяснить при помощи петли обратной связи, изображенной на рис. 24. Информация о последовательных изменениях уровня хранится в памяти и, суммируясь, дает некоторую среднюю величину уровня раздражения. Эта средняя величина, полученная на выходе клетки па-

мяти (*2*), регулирует порог возбудимости чувствительной клетки путем торможения. Описание весьма схематично, но в общих чертах оно верно, хотя в живых организмах отдельные процессы протекают гораздо сложнее. Петли обратной связи с автоматическим приспособлением к средней величине полученного сигнала все чаще используются инженерами в некоторых сложных усилителях.

Какова бы ни была реакция — «позиционная» или «скоростная», — в обоих случаях необходимо, чтобы в чувствительной клетке произошел переход специфического вида энергии, полученной из внешней среды (световой, механической, тепловой, акустической), в химический процесс возбуждения нейрона, то есть привел к деполяризации мембраны нейрона. Несмотря на то что этот процесс изучался неоднократно, надо признаться, что здесь далеко не все ясно. Так, глазу достаточно воспринять всего несколько фотонов, чтобы возникло ощущение света. Но несколько фотонов — это очень небольшое количество энергии. Один фотон может подействовать не более чем на одну молекулу зрительного пигмента, точнее всего на несколько ионов. А по самым скромным подсчетам требуются как минимум несколько тысяч ионов, чтобы нарушилось динамическое равновесие в одной точке и был пущен в ход механизм, генерирующий нервный импульс. Нет ли здесь какого-нибудь усилителя? В принципе это возможно: для этого достаточно, чтобы измененная молекула превратилась в фермент, то есть в активный катализатор, одним своим присутствием ускоряющий превращение сотен других молекул. И если эти молекулы в свою очередь станут ферментами, получится значительное усиление. Но это пока лишь гипотеза, не опирающаяся на экспериментальные данные. Бионик вправе только задать вопрос, не зная заранее, обещает ли ответ на этот вопрос новые открытия в будущем и можно ли построить усилитель на основе явлений катализа.

Возможно, что эта высокая чувствительность имеет совсем иную природу и похожа на явление, получившее в период зарождения радиосвязи название суперреакции. Чтобы генерировать нервный импульс, энергия деполяризации клетки должна достигать не менее

30 милливольт (рис. 25, *а*). Но если нервная клетка, не получая энергии извне, спонтанно посылает нервные импульсы определенной частоты, то потребуется очень слабое внешнее воздействие, чтобы изменить эту естественную частоту. Нейрон, постоянно подвергающий ее анализу, обнаруживает изменения ритма и передает в мозг для дальнейшей переработки только информацию об этих изменениях. Это свойство позво-

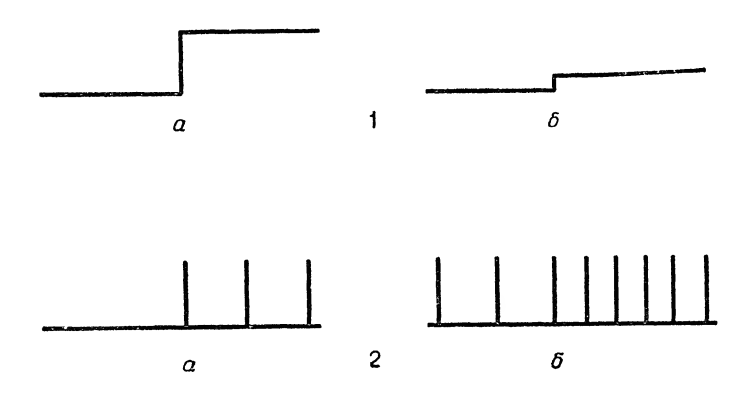


Рис. 25. Диаграмма показывает реакции нейрона в зависимости от его состояния.

а — нормальная реакция (нейрон «молчит» до действия раздражителя); *б* — «суперреакция» клетки (до раздражения нейрон спонтанно активен, достаточно слабого раздражения, чтобы вызвать его сильную реакцию). *1* — отметка действия раздражителя; *2* — ответная реакция чувствительной клетки.

ляло значительно увеличивать чувствительность детектора в радиоприемниках. Радиолюбители той ранней героической эпохи конструировали приемники на одной-единственной лампе, но это не мешало им принимать сигналы со всего мира. Лампа регулировалась так, что она находилась на границе срабатывания (что было довольно тонким делом), и эта настройка периодически прерывалась в ритме, который не воспринимается человеческим ухом. Но появление периодического сигнала (телеграфного кода или слова) вызывало изменение естественной частоты, это изменение обнаруживалось и передавало информацию, заключенную в сигнале. Радиолюбители, строившие су-

пергетеродины, должно быть, и не догадывались, что занимаются бионикой.

Какую пользу может извлечь бионика из этого сказочно богатого мира природных воспринимающих устройств? Возьмем для начала крайний случай. Даже если принцип действия какого-то природного приемника неясен, его все-таки можно попытаться изолировать и встроить в машину. Но здесь обязательно встретятся трудности и препятствия. Первое — необходимость сохранить орган живым. Предположим, что это удалось. Впереди второе препятствие: многочисленные чувствительные клетки действуют только в том случае, когда петля обратной связи замкнута, а для этого необходимо выделить еще и часть нервной системы. В конце концов потребуется присутствие всего животного. При этом не следует забывать, что наша цель — не просто измерить, а использовать сигнал, проходящий по нервному волокну. Не исключено, что он окажется слишком слабым. А если приходится еще и встраивать электронный усилитель между природным органом и механизмом, использующим его сигналы, то теряется всякий смысл такой затеи. Надо сказать, что в этой области еще никто не сумел воплотить свои идеи на практике.

ЧТО ВНОСЯТ В БИОНИКУ ПРИРОДНЫЕ ПРИЕМНИКИ

Мы очень часто восхищаемся чувствительностью природных органов чувств. Но их назначение не в том, чтобы делать тонкие физические измерения на самой границе фонового шума; они просто должны снабжать животное информацией, необходимой для его жизни, а это далеко не одно и то же. Поэтому нужно детально изучить природу воспринимающих рецепторов, прежде чем их копировать. Хороший пример — термический орган американской гремучей змеи. Эта змея обнаруживает мышь на расстоянии нескольких метров только потому, что мышь теплее окружающего воздуха.

Термический орган, находящийся на морде змеи впереди и несколько ниже глаз, представляет собой два богато иннервированных углубления; он позволяет



Рис. 26. Снимок головы американской гремучей змеи, на которой виден «термический орган» (вверху), и термография головы человека, то есть фотография, сделанная при помощи пленки, чувствительной к инфракрасному излучению (внизу).

змее чувствовать разность температур в одну тысячную градуса. Разве это не удивительно? Термические детекторы человеческой кожи не достигают такого совершенства, они способны различать только десятые доли градуса. Изучение термического «глаза» гремучей змеи показало, что он проявляет чувствительность к сигналам мощностью порядка миллионной доли ватта. Это высокая чувствительность. Но чувствительность инфракрасных детекторов, созданных для тех же целей человеком, в сотни тысяч раз больше. Есть снайперские винтовки, инфракрасные прицелы которых позволяют в полной темноте обнаружить цель на расстоянии нескольких сотен метров только благодаря теплу ее тела.

Значит, с точки зрения бионики совершенно бессмысленно заниматься термическим «глазом» змеи? Это несколько преждевременное заключение. Во-первых, термический орган змеи, несмотря на чрезвычайно малые размеры, обладает более точной направленностью по сравнению с искусственными приборами. На один квадратный миллиметр чувствительного слоя органа приходится в среднем тысяча воспринимающих элементов, то есть в сотни раз больше, чем в самых миниатюрных приборах. И если этот локатор менее чувствителен, чем некоторые наши приборы, то не следует забывать, что в нем нет никаких усилителей между органом и нейронной сетью головного мозга. Интересно было бы найти принцип трансформации термической энергии в химическую и попытаться сконструировать инфракрасный локатор типа «змеиный глаз», связанный с усилителем. Он имел бы большие преимущества перед природным тепловым локатором. Для этого нужна совместная работа биолога и инженера.

Так что не следует обращать внимание только на те естественные органы, которые действуют лучше приборов, созданных человеком. И это вполне естественно: бионик не должен ничем пренебрегать, потому что всякое исследование может стать основой для создания еще более совершенных локаторов. К тому же он имеет возможность пользоваться любыми усилителями для технического воплощения своих новых идей.

Однако не следует впадать и в другую крайность — приветствовать все без исключения новые открытия в области чувств животных.

Это легко иллюстрировать многими примерами; приведем наиболее убедительный из них — то, как животные предчувствуют землетрясение. Существует немало рассказов о том, что животные проявляют сильное беспокойство за несколько часов до землетрясения, но не все они достоверны. Японские ученые Хатаи и Абе провели серию экспериментов над рыбками-сомиками вида *Parasilurus asotus*. Они помещали их в заземленный аквариум и каждые шесть часов подставку аквариума слегка встряхивали. Обычно рыбы не реагировали на такие толчки, но за несколько часов до землетрясения поведение рыб резко менялось и те же легкие толчки вызывали бурную реакцию. Как же рыбы узнавали о предстоящем землетрясении?

Хотя землетрясение кажется внезапным, силы, деформирующие земную кору, накапливаются обычно в течение некоторого времени. Когда они достигают известного предела, начинается мощное сотрясение земных слоев. Значит, чтобы предвидеть землетрясение, рыба должна в той или иной форме получить сигнал о том, что напряжение в земной коре приближается к предельному. И это объясняется отнюдь не сверхъестественными способностями рыб. Известно, например, что в земной оболочке постоянно циркулируют так называемые «теллурические токи» и накануне землетрясений в них наблюдаются возмущения. А эти рыбки, как и многие другие виды рыб, имеют органы, чувствительные к очень слабым электрическим колебаниям. У некоторых видов рыб есть даже своеобразный радар, улавливающий электрические колебания, а не электромагнитные волны. (Это свойство настолько интересно с точки зрения бионики, что заслуживает более детального рассмотрения, и мы позднее вернемся к нему.) Возможно, именно рыбки-сомики помогут найти идею прибора, предсказывающего землетрясения, хотя, конечно, будет очень непросто добиться, чтобы этот прибор был надежен в работе и давал точные показания.

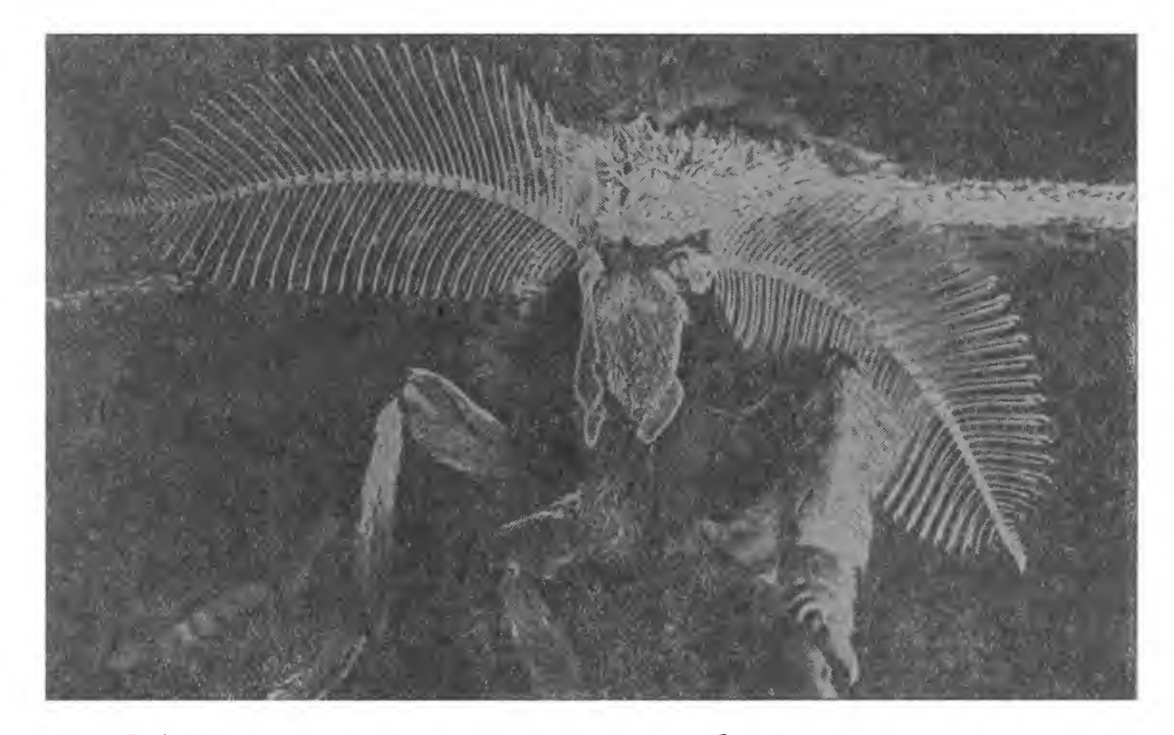


Рис. 27. Антенны шелкопряда воспринимают запах самки. Это на редкость чувствительный «нос»

На такие же выводы нас наталкивает пример из другой области, из царства запахов *. Тут пальма первенства, безусловно, принадлежит бабочке тутового шелкопряда (*Bombyx mori*), того самого, чья гусеница известна под названием шелковичного червя. Для продолжения рода самцу шелкопряда необходимо отыскать самку. Жизнь бабочек так коротка, что способы отыскивать пару должны быть весьма эффективны. Казалось бы, для этого вполне подходит запах: самка выделяет специфическое вещество, молекулы которого легко и быстро распространяются в воздухе; самцы улавливают этот запах и стремятся к его источнику. Но тут есть одна немаловажная деталь: плотность молекул пахучего вещества с расстоянием быстро убывает до ничтожной величины. Поэтому самцы должны обладать исключительной восприимчивостью к запаху. Высокую чувствительность самцов шелкопряда к запаху установил еще в XIX веке французский натуралист Анри Фабр. Меченные цветными красками самцы шелкопряда с расстояния до десяти километров в очень короткое время прилетали к садку, в котором была спрятана самка. Надо полагать, что шелкопряд улавливает в воздухе отдельные молекулы выделяемого самкой специфического органического вещества (оно отличается невероятно сложной формулой и неимоверно трудным названием). У шелкопряда нет носа, органом обоняния ему служат пушистые усики, антенны, расположенные по бокам головы. Если их срезать, бабочка перестанет различать запахи.

Поразительна вкусовая чувствительность некоторых животных. Лосось, поднимаясь из моря вверх по реке, находит свой родной ручей по вкусу воды **. Собственно говоря, изучение органов вкуса и обоняния еще только начинается. А сколько интересных возможностей открыло бы изобретение хорошего локатора запахов! Для бионики это целый новый мир, но его расцвет — в будущем. Сначала надо понять и объяснить,

---

* Интересующимся можно рекомендовать книгу Р. Х. Райта «Наука о запахах», изд-во «Мир», М., 1966.

** Существуют экспериментальные данные, показывающие, что лосось ориентируется по запаху, а не по вкусу воды.

как работают естественные рецепторы (детекторы), воспринимающие запах. Существует много теорий, но ни одну из них нельзя считать удовлетворительной. Бионика должна сыграть роль катализатора, ускоряющего исследования природных локаторов вкуса и запаха, потому что уже сейчас можно предвидеть интереснейшие области применения этих открытий на практике *.

---

* Уже существуют модели, различающие запахи (см., например, Р. М. Мазитова, В. Н. Охотская, Б. И. Пучкин «Обоняние и его моделирование», изд-во СО АН СССР, Новосибирск, 1966).

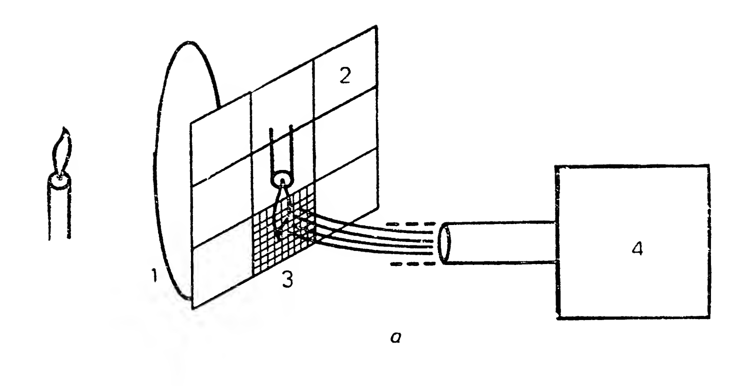
ГЛАВА 6
ФОРМА И ЦВЕТ

МОЖЕТ ЛИ МАШИНА ВИДЕТЬ

Глаз — важнейший из органов чувств человека. Именно зрение доставляет нам бо́льшую часть информации о внешнем мире. Вполне естественно, что обмен информацией между людьми опирается на зрительно воспринимаемые объекты. Чаще всего это газеты или книги, а также произведения живописи и фотоснимки; даже появление телефона не прекратило обмена письмами. Зрительная информация играет важную роль во всех областях человеческой деятельности. Можно ли вообразить себе промышленность без планов и чертежей или деловые предприятия без письменных приказов и подписанных договоров? Все эксперименты, проводимые в лабораториях, фиксируются в таблицах и графиках.

Если мы хотим подвергнуть письменную информацию машинной обработке, надо сначала перевести ее в форму, приемлемую для машины. Известно, что машины хорошо обрабатывают перфокарты. Поэтому все цифровые данные таблиц и счетов, балансы, указания и другие письменные материалы переносятся на особые карточки, а затем специалисты при помощи машинок пробивают перфорации на картах. Отдельные перфорации представляют собой ту же информацию, которая поступила в форме цифр или букв, только теперь она перекодирована и подготовлена к обработке на электронной вычислительной машине.

Но не всегда легко перевести всю письменную информацию на перфокарты. И вот простой пример. Предположим, в окошечко банка подан чек. Совпадает ли подпись на чеке с подписью вкладчика? Операцию сравнения можно ускорить с помощью простой механизации: автомат отыскивает нужную подпись в картотеке и передает ее изображение на экран телевизора на столе служащего. Но главная задача — сравнение двух подписей — лежит на ответственности человека. Дело в том, что даже самая характерная



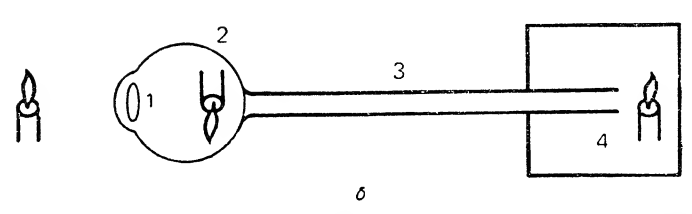


Рис. 28. Оптический анализатор, основанный на устаревших представлениях о роли сетчатки.

а — оптический анализатор: *1* — линза, *2* — рассматриваемая поверхность, *3* — мозаика светочувствительных клеток, *4* — счетно-решающее устройство; *б* — глаз и мозг: *1* — линза-хрусталик, *2* — сетчатка, *3* — оптический нерв, *4* — зрительный центр в затылочной области коры больших полушарий.

подпись, которую трудно подделать, варьирует от случая к случаю, и это осложняет полную автоматизацию процесса. Однако, если речь идет об одной определенной операции — сличении двух подписей, — этого еще можно добиться. Нужно только создать хитроумное приспособление, которое могло бы прямо прочесть подпись и перекодировать ее, минуя классическую стадию перфокарт. С неуклонным ростом механизированной обработки информации возникает все более настоятельная потребность в машинах, которые могли бы непосредственно воспринимать зрительную информацию. А почему бы не использовать на входе машины оптический анализатор, копирующий функции человеческого глаза? Какое широкое поприще открывается перед биоником!

Физиолог сразу укажет инженеру на огромные трудности, которые его ожидают. Невозможно пересчитать все светочувствительные элементы, образующие сетчатку человеческого глаза. Но если подсчитать клетки на отдельном участке сетчатки, а затем умножить это число на количество таких участков, то их окажется несколько сот миллионов. Трудно построить машину, которая состояла бы из такого же числа мелких светочувствительных элементов. Но так или иначе, эту трудность еще можно преодолеть. Схематически такая машина показана на рис. 28, *а*. Оптическое приспособление передает изображение рассматриваемого объекта на плоскость *2*. Эта поверхность разбита на ряд более мелких участков. Сеть (*3*) светочувствительных клеток анализирует часть целого изображения. Чтобы не усложнять изображение, показаны только некоторые клетки этой светочувствительной сети, но их может быть гораздо больше. Информация, поступающая от отдельных ячеек, передается в память машины и хранится для последующей обработки. Вся поверхность объекта исследуется путем перемещения сети и последовательного фиксирования каждой ячейки. Электронные машины работают с огромной скоростью (миллионные доли секунды), и необходимость рассматривать большое количество мелких ячеек компенсируется скоростью считывания. Основная идея этого устройства в том, что глаз (рис. 28, *б*) сравнивают с фотокамерой. Образ, переданный на сетчатку (*2*) через хрусталик (*1*), воспроизводится затем в анализирующей системе мозга (*4*). Такое устройство можно создать, и оно, по-видимому, будет действовать. Но имеет ли все это отношение к бионике? Едва ли.

КАК РАБОТАЕТ ГЛАЗ В ЖИВЫХ СИСТЕМАХ

В наше время стало ясно, что глаз нельзя уподоблять фотокамере. Сетчатка — не просто постоянно работающая светочувствительная поверхность. Это сложный орган, производящий операции отбора и анализа зрительных сигналов. В чем смысл предварительной обработки первоначальной информации? Сравним для начала две цифры: в сетчатке сто миллионов свето-

чувствительных клеток, а зрительный нерв содержит всего лишь миллион нервных волокон, то есть в сто раз меньше. Значит, между светочувствительными клетками и нейронами*, аксоны которых образуют зрительный нерв, существует не просто линейная связь, как в искусственной сети на рис. 28, *а*. Если учесть, что информация, полученная из внешнего мира, передается без потерь, такое уменьшение числа волокон на выходе могло произойти только в результате определенного числа операций. Какова же природа и назначение этих операций?

Слишком трудно объяснить эти явления, изучая глаз человека. И не только из-за огромного числа клеток, но и потому, что сам глаз обладает странными особенностями. Во-первых, поле зрения глаза далеко не однородно. Мы инстинктивно обращаем взгляд на предмет, который хотим рассмотреть, и при этом приходится поворачивать не только глаза, но даже и голову. За пределами поля четкого видения (его охват — всего несколько градусов) острота зрения постепенно падает. Причина этого заключается в иннервации светочувствительных клеток: из миллиона волокон зрительного нерва бо́льшая часть связана с несколькими миллионами клеток, которые выстилают участок глазного дна как раз в том месте, куда попадает изображение предметов, находящихся прямо перед нами. По мере удаления от центра к периферии сетчатки иннервация становится беднее. Во-вторых, человеческий глаз никогда не находится в покое — всегда отмечаются мелкие беспорядочные колебания глазного яблока в довольно быстром ритме (несколько колебаний в секунду). Сам человек обнаружить эти колебания, глядя в зеркало, не может, потому что их амплитуда очень мала. Для того чтобы их заметить, нужна специальная аппаратура. Но это ничтожное колебательное движение — необходимое условие нормального зрения. Если при помощи специального оптического приспособления, похожего на контактную линзу, фиксировать на сетчатке изображение простого объекта так, чтобы оно было неподвижным по отношению к сетчатке, можно наблюдать любопытное

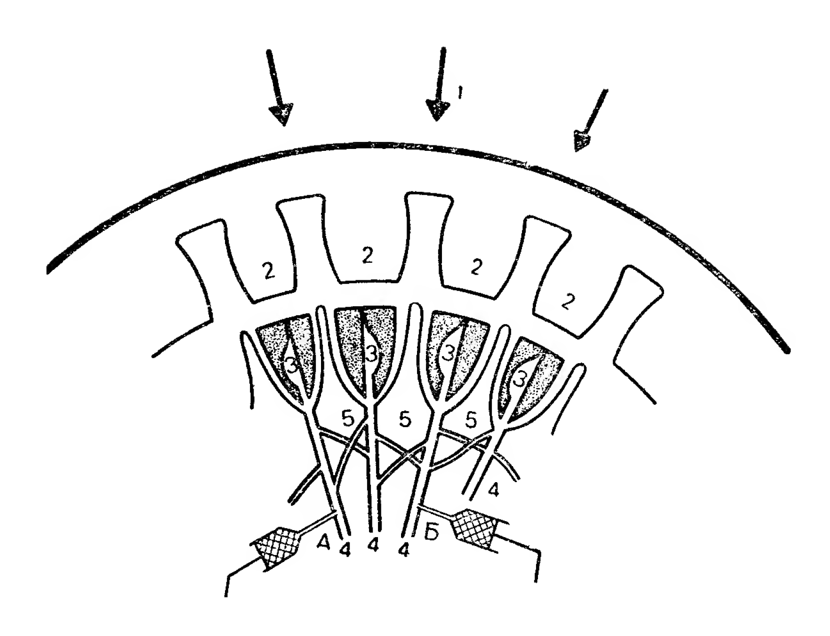
---

* Ганглиозные клетки сетчатки.

явление: изображение распадается на отдельные кусочки, а затем исчезает.

И последняя, но самая серьезная трудность — проводить эксперименты на человеке совершенно недопустимо. Нельзя вводить микроэлектроды в зрительный нерв живого человека. Нужно найти ему замену, например животное, глаз которого был бы проще устроен, чем глаз человека. К счастью, таких животных немало. Особенно удачной естественной моделью оказался глаз примитивного ракообразного лимулуса (*Limulus*). Это существо практически не эволюционировало и осталось неизменным с глубокой древности. Глаз его похож на сложные глаза насекомых, но в нем примерно тысяча светочувствительных клеток, то есть в сто тысяч раз меньше, чем в глазу человека. Схема строения глаза лимулуса показана на рис. 29. Каждая чувствительная клетка имеет собственную линзу (*2*), которая фокусирует падающий на нее свет (*1*). К этим светочувствительным клеткам подходят нервные окончания (*3*), где происходит преобразование полученной световой энергии в химическую энергию деполяризации, генерирующую нервные импульсы. Импульсы передаются по аксонам (4) в мозг для окончательной обработки. Чтобы исследовать функции глаза, в зрительный нерв лимулуса вводили микроэлектроды. Как мы уже знаем, эта операция настолько тонкая, что она позволяет наблюдать при помощи электродов *А* и *Б* отдельные импульсы, идущие от двух соседних простых глазков.

Что же происходит при избирательном освещении отдельных глазков (рис. 30)? Если осветить пучком света (*1*) глазок, связанный с нервным волокном *А*, нервные импульсы возникают только в этом волокне; соседний глазок *Б*, не получивший раздражения, не посылает никаких сигналов. Обратный эффект наблюдается в том случае, если освещен пучком света (*2*) глазок *Б*. При одновременном освещении глазков *А* и *Б* серии нервных импульсов регистрируются и в волокне *А* и в волокне *Б*, но частота каждой серии меньше той, которая получена при раздельном освещении каждого глазка. Подобный эффект уже знаком нам по явлению аккомодации, автоматического приспособления чувствительных клеток к средней величине стиму-



1 — падающий свет; *2* — линзы; *3* — дендриты светочувствительных клеток; *4* — аксоны зрительных клеток; *5* — сеть коллатеральных взаимосвязей (коллатерали — ветвления аксонов).
А, Б — микроэлектроды, введенные в аксоны.

ла — раздражителя. В данном случае происходит аналогичное явление, только приспособление на этот раз определяется смежными клетками: количество света, полученное одной клеткой, меняет порог чувствительности соседних клеток. В случае аккомодации это приспособление заключается в замыкании клетки на саму себя через петлю обратной связи. Здесь принцип торможения в основном тот же, только петли обратной связи сообщаются и замыкают клетки друг на друга, как это видно на рис. 31. В действительности это происходит через сеть мелких волокон (*5*), конечные синапсы которых оказывают влияние на уровень поляризации тел нейронов (рис. 29). Такое торможение называют латеральным.

В чем смысл латерального торможения? Как показано на рис. 32, оно усиливает контрасты. Если перед искусственным детектором — фотоэлементом (*2*) и глазом лимулуса (*3*) двигать одну и ту же фигуру

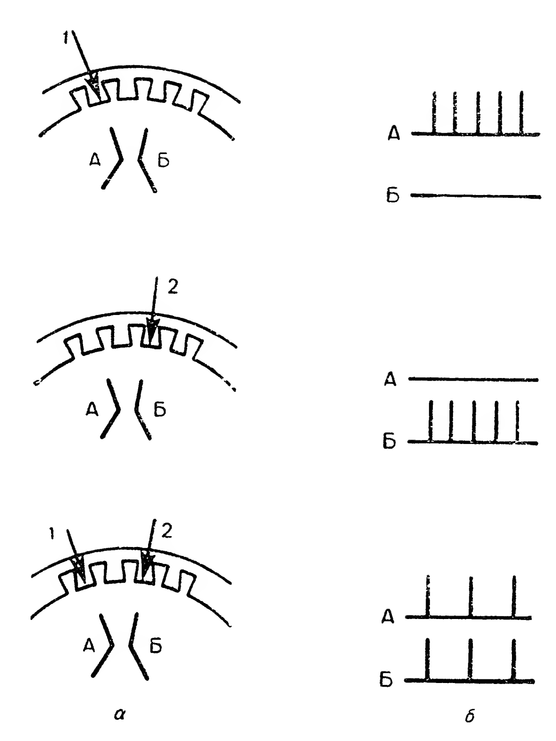


Рис. 30. Явления латерального торможения в глазу лимулуса. *а* — избирательное освещение глаза источником света в точках *1* и *2*; *б* — соответствующие нервные сигналы.

(*1*) с четкими границами, оказывается, что фотоэффект точно пропорционален стимулу, а глаз моллюска дает сигнал в несколько раз более сильный. Это еще раз подтверждает жизненно важную роль чувственной информации; абсолютно равномерно освещенная поверхность не содержит никакой информации, реакцию вызывают только изменения во внешней среде. Подчеркивая контрасты, латеральное торможение позволяет лучше воспринимать эти изменения и обогащает видимый мир лимулуса.

Сходные проблемы приходится решать при создании машин для автоматического чтения. Информация заключается только в контрастах и вариациях — черное и белое в написанном или печатном тексте, оттен-

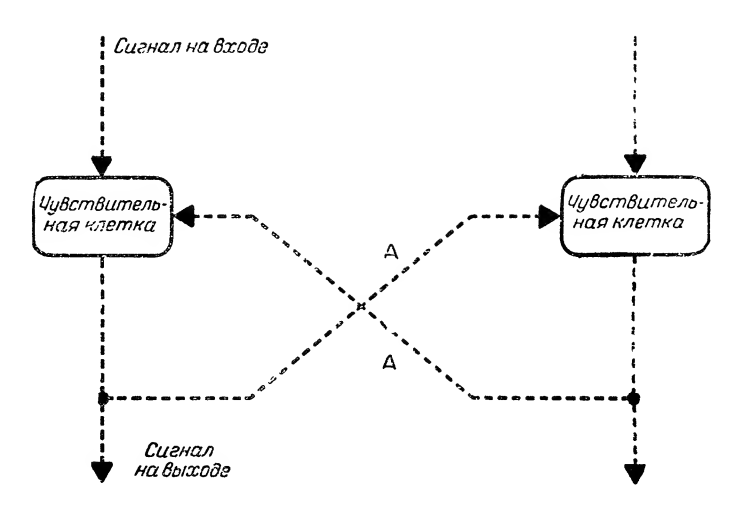


Рис. 31. Латеральное торможение — результат взаимодействия смежных чувствительных клеток через соединения *А* (см. рис. 29,5).

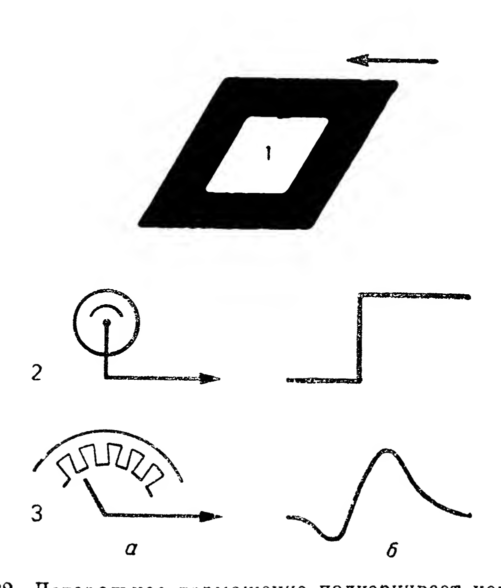


Рис. 32. Латеральное торможение подчеркивает контрасты.

а — рецепторы; *б* — сигналы на выходе рецепторов.

1 — раздражитель (освещенная пластинка, двигающаяся на черном фоне в направлении, указанном стрелкой), *2* — фотоэлемент, *3* — глаз лимулуса.

ки в фотографии. Глаз лимулуса может дать бионикам идею гораздо более совершенной машины, чем простая сеть светочувствительных ячеек, показанная на рис. 28. Такая машина была построена в лаборатории «Дженерал электрик» X. Гильдебрандом. Ее работа иллюстрирует огромные преимущества аналитических систем, основанных на принципе латерального торможения. На языке математиков можно сказать, что эта машина вычисляет взаимную кор-

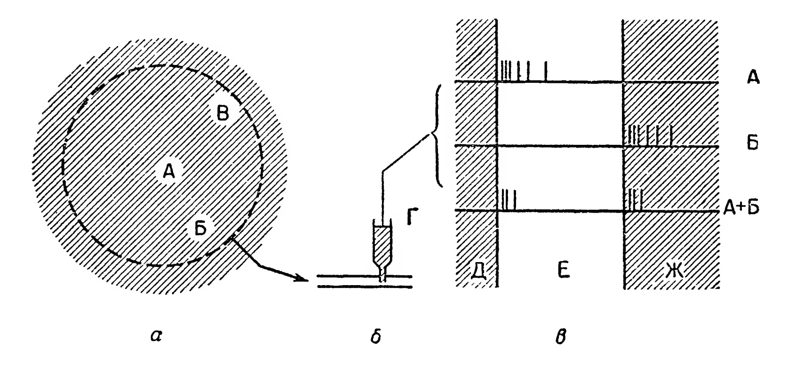


Рис. 33. Латеральное торможение в сетчатке глаза кошки.
а — схематическое изображение участка сетчатки; раздражения точечным источником света в центре рецептивного поля (*А*) и на его периферии (*Б*), *В* — штриховая линия, обозначающая границы рецептивного поля; *б* — изучаемое нервное волокно; *Г* — микроэлектрод; *в* — нервные сигналы в волокне; *Д* — освещение отсутствует, *Е* — свет включен, *Ж* — свет выключен.

реляцию между представленным ей объектом и ранее заложенным в нее изображением. Если правильно подобрать коэффициенты, выражающие результаты сопоставления этих объектов, можно создать машину, которая будет обнаруживать в своем поле зрения образы, сходные с изображениями, заложенными в нее априори. Чем больше будет в этой машине отдельных клеток и чем сложнее будет связывающая их сеть, тем более надежной и точной работы можно от нее ожидать.

Если даже такой простой и примитивный глаз, как глаз лимулуса, подал ученым столько интересных идей, то можно себе представить, как обогатит биоников изучение более совершенных органов зрения!

И эти надежды не будут обмануты. Кстати, нужно отметить, что законы латерального торможения, открытые у лимулуса, оказались универсальными. Рассмотрим глаз кошки; с помощью микроэлектрода можно наблюдать все происходящее в изолированном нервном волокне зрительного нерва. При освещении сетчатки точечным источником света обнаруживается определенный участок (его называют рецептивным полем), в пределах которого освещение вызывает серию импульсов в одном нервном волокне зрительного нерва *. Как показано на рис. 33, эти сигналы неоднородны, и их форма зависит от того, на какой участок рецептивного поля падает свет. Когда свет падает в точку *А* в центральной части поля, в волокне сразу же возникает серия сигналов. Благодаря аккомодации сигналы постепенно затухают, и если раздражитель остается неизменным, сигналы в конце концов исчезают совсем. Это показано в строке *А* на рис. 33, *в*. При выключении света реакция отсутствует. Наоборот, в случае раздражения точки на периферии рецептивного поля (*Б*) при включении света сигнал отсутствует, а выключение порождает серию сигналов (строка *Б* рис. 33, *в*). Здесь также действует аккомодация, которая в темноте быстро сводит сигналы к нулю. Если одновременно дать свет в точках *А* и *Б*, можно заметить, что частота импульсов в точке *А* уменьшается, а при выключении то же явление наблюдается в точке *Б*. Таким образом, и здесь происходит взаимное торможение, но так как появление сигналов зависит от того, какой участок рецептивного поля освещен — центр (*А*) или периферия (*Б*), — можно сделать вывод, что функция подчеркивания контрастов зависит не только от положения, но и от скорости объекта, движущегося в поле зрения животного.

Можно ожидать, что такое же торможение возникает и в том случае, когда вместо точечных раздражений в отдельных местах сетчатки (это искусственный прием, удобный для изучения явления в простой форме) мы встречаемся с раздражением от естественных объектов, имеющих определенные размеры. Эта

---

* Напомним, что волокна зрительного нерва — это аксоны ганглиозных клеток сетчатки.

новая возможность в высшей степени интересна для бионнков. Очень важно сконструировать машину, которая реагировала бы только на движущиеся объекты. Часто на экране радара, который находится в комнате диспетчера аэродрома, изображение засоряют помехи от неподвижных предметов, попадающих в луч радара: строений, деревьев, мачт электропередач. Эти паразитные эхо-сигналы маскируют сигналы, отраженные от самолетов. Но самолеты отличаются от остальных объектов тем, что они движутся. Именно движение позволяет диспетчеру различать самолеты и направлять их к посадочной полосе. Насколько облегчилась бы его работа, если бы с экрана просто исчезли все неподвижные предметы!

Воспринимает ли сетчатка движение? На этот вопрос ответят эксперименты. По указанным выше причинам эксперименты следует проводить не на человеке, а на животном, глаз которого, более совершенный, чем глаз лимулуса, был бы в то же время достаточно прост, чтобы служить естественной моделью; при этом поведение животного должно быть тоже довольно примитивным, чтобы его реакция на стимулы была достаточно однозначна. Глаз лягушки отвечает всем этим требованиям и представляет собой прекрасную естественную модель. В отличие от человека лягушка не переводит взгляда с предмета на предмет. Наоборот, когда это земноводное двигает головой, его глаза как бы поворачиваются в обратном направлении, оставаясь фиксированными на определенной точке. На сетчатке глаза лягушки нет особо чувствительного участка, подобного желтому пятну глазного дна человека: ее поле зрения имеет практически однородную структуру. Кроме того, связь глаза лягушки с мозгом более прямая, чем у человека. Должно быть, этот тип зрения достаточно эффективен, потому что оно служило лягушке на протяжении целых геологических эпох и лягушка не только не исчезла с лица Земли, но и не особенно изменилась за это время.

Анатомическое строение сетчатки лягушки давно изучено. С. Рамон-и-Кахал, лауреат Нобелевской премии за 1906 год, изобрел оригинальный метод окраски тканей при помощи соединений серебра. Нервные ткани, избирательно абсорбируя краситель, четко выде-

ляются на фоне окружающих клеток. На препаратах сетчатки видна разветвленная сеть дендритов и крупные ядра нервных клеток. Оказалось, что существует множество разных типов нейронов, но это разнообразие можно свести к двухслойной структуре, которая

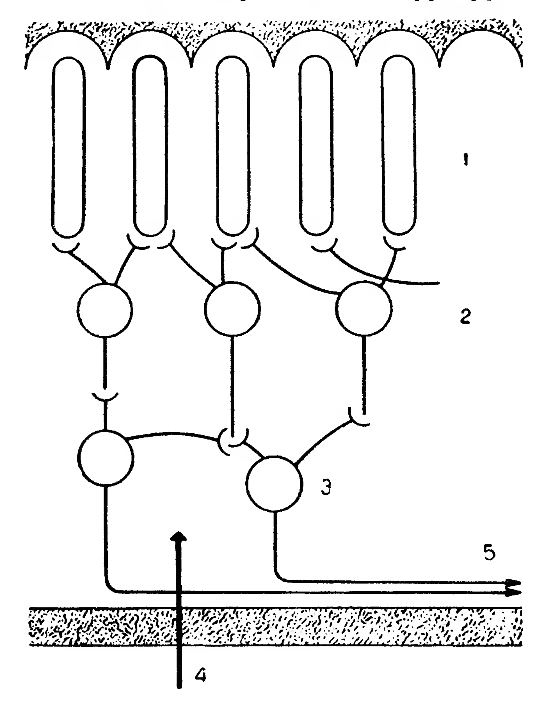


Рис. 34. Упрощенная схема сетчатки глаза лягушки.

1 — светочувствительные клетки; *2* — промежуточные биполярные нервные клетки; *3* — мультиполярные (ганглиозные) нервные клетки на выходе сетчатки; *4* — направление падающего на глаз света; *5* — нервные волокна на выходе из сетчатки.

показана на рис. 34. Светочувствительные клетки передают возбуждение на промежуточные, «биполярные», клетки, а те в свою очередь связаны с крупными нейронами, которые называются мультиполярными. Аксоны этих нейронов и формируют зрительный нерв, выходящий из глаза. В сетчатке лягушки содержится около миллиона светочувствительных клеток, три миллиона биполярных нейронов и полмиллиона мульти-

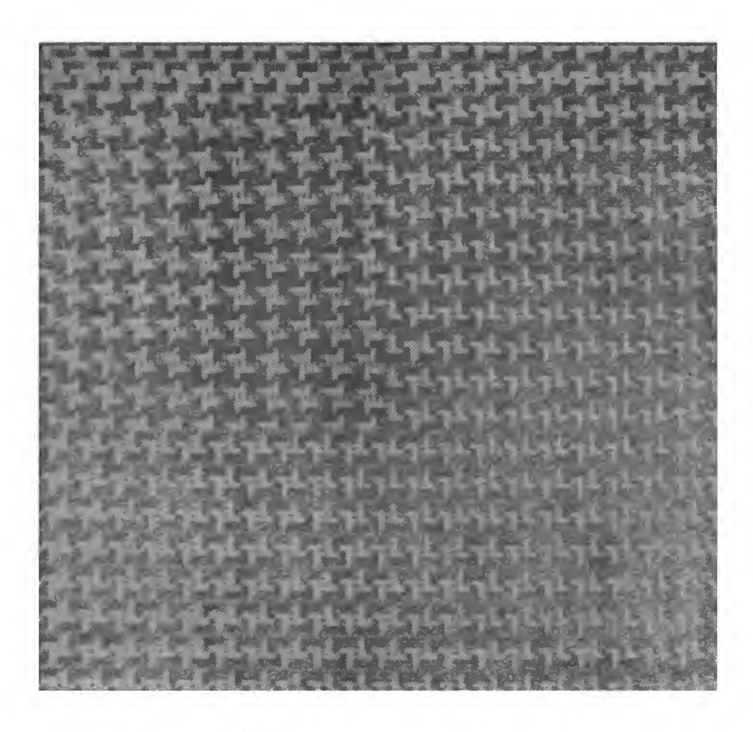


Рис. 35. Если держать рисунок на некотором расстоянии, то неравномерность геометрической структуры (слева) сразу бросается в глаза, а смысловые отличия не обнаруживаются (справа).

полярных нейронов на выходе. Такая вычислительная система с двумя уровнями обработки может производить сложные операции, и в частности она непосредственно воспринимает движение. Это и является ее основной функцией, как показала в своих работах группа ученых из Массачусетского технологического института (Бостон) — Дж. Леттвин, Х. Матурана, У. Мак-Каллох и В. Питтс*. В этих опытах объекты определенной формы, двигавшиеся с заданной скоростью, предъявлялись лягушке, специально подготовленной для регистрации нервных сигналов. Выясни-

---

* См. «Электроника и кибернетика в биологии и медицине», ИЛ, М., 1963.

BERLIN	LONDON	TANGER	MEXICO	BERLIN	LONDON	TANGER	MEXICO
LONDON	MADRID	BOSTON	TANGER	LONDON	MADRID	BOSTON	TANGER
BOSTON	MEXICO	BERLIN	LONDON	BOSTON	MEXICO	BERLIN	LONDON
MADRID	BERLIN	LONDON	BOSTON	MADRID	BERLIN	LONDON	BOSTON
TANGER	LONDON	MEXICO	MADRID	TANGER	LONDON	MEXICO	MADRID
MEXICO	BOSTON	TANGER	BERLIN	MEXICO	BOSTON	TANGER	BERLIN
BOSTON	TANGER	MADRID	TANGER	BOSTON	TANGER	MADRID	TANGER
TANGER	MEXICO	BOSTON	BERLIN	TANGER	MEXICO	BOSTON	BERLIN
BERLIN	MADRID	TANGER	MEXICO	BERLIN	MADRID	TANGER	MEXICO
TANGER	BOSTON	LONDON	MADRID	TANGER	BOSTON	LONDON	MADRID
BERLIN	LONDON	TANGER	MEXICO	BRCXZM	ZNMKVB	SKLGRV	LONDON
LONDON	MADRID	BOSTON	TANGER	KJMPZV	KRGLKS	MZXCLJ	BERLIN
BOSTON	MEXICO	BERLIN	LONDON	NBCRNJ	JHBVLM	RVCRZN	MADRID
MADRID	BERLIN	LONDON	BOSTON	LVXCDL	RZBHRT	LTSXPJ	MEXICO
TANGER	LONDON	MEXICO	MADRID	RMNHKB	TVSMCF	HMBVRG	TANGER
MEXICO	BOSTON	TANGER	BERLIN	ZVRQZN	LRXNKV	VZPMJK	BOSTON
BOSTON	TANGER	MADRID	TANGER	CHRSTL	BKHCXR	LTSRHC	MEXICO
TANGER	MEXICO	BOSTON	BERLIN	GRVMBH	LDCZMN	HBKVRG	BERLIN
BERLIN	MADRID	TANGER	MEXICO	BRCXZM	ZNMKVB	SKLGRV	MADRID
TANGER	BOSTON	LONDON	MADRID	KJMPZV	KRGLKS	MZXCLJ	LONDON
MEXICO	BOSTON	TANGER	BERLIN	MADRID	BERLIN	BOSTON	BERLIN
BOSTON	TANGER	MADRID	TANGER	BOSTON	TANGER	LONDON	MADRID
TANGER	MEXICO	BOSTON	BERLIN	LONDON	BERLIN	MEXICO	BERLIN
BERLIN	MADRID	TANGER	MEXICO	TANGER	MADRID	BOSTON	MADRID
TANGER	BOSTON	LONDON	MADRID	BERLIN	MEXICO	MADRID	LONDON

лось, что рецептивные поля, которые ограничены внутренними нейронными связями, можно разделить на четыре категории. Сетчатка лягушки передает в мозг не фотографическое изображение предмета, а более обобщенную информацию. Первая ступень анализа — анализ местного контраста, подвижного или неподвижного. Рецептивное поле второго типа дает информацию о размере объекта, который создает этот контраст. Наиболее сильную реакцию у лягушки вызывали мелкие движущиеся объекты, особенно если они двигались неровно, как насекомое в полете. Лягушке не приходится детально анализировать образ окружающего ее мира: чтобы настигнуть свою добычу, она воспринимает образы непосредственно. Другие детекторы доставляют дополнительную информацию о размерах движущегося объекта и об изменениях в освещенности крупных участков. Эта информация относится к предметам, слишком крупным, чтобы стать добычей, и, следовательно, опасным для лягушки.

Тогда она спасается бегством. Наконец, замеряется общий уровень освещенности, который влияет на уровень общей аккомодации. Эти различные типы воспринимающих механизмов связаны со структурами, представляющими собой сеть дендритов крупных мультиполярных клеток сетчатки.

Особенности, обнаруженные и изученные на лягушке, сохраняются на всех уровнях эволюции животных. Г. Барлоу, Р. Хилл и В. Левик обнаружили то же самое в глазу кролика: информация о направлении и скорости движения обрабатывается непосредственно нервными клетками сетчатки. У человека можно предполагать более многочисленные виды восприятий. Это проверяется на простом опыте. Посмотрите на левый рисунок 35. Вам сразу бросается в глаза какое-то нарушение рисунка в левом верхнем углу. А при взгляде на правый рисунок вы не находите никаких нарушений. Но более внимательное, вдумчивое изучение покажет, что в нем некоторые слова имеют смысловое значение (названия известных городов), а другие — просто случайный, бессмысленный набор букв. Сетчатка глаза дает бионику замечательную модель, на основе которой можно сконструировать машины, различающие правильные формы или движение. Для этого понадобится, конечно, большое количество элементов, в среднем по 4 нейрона на каждую светочувствительную клетку. То, что было невыполнимо раньше, в эпоху вакуумных ламп, стало возможным с появлением транзисторов. Недавно созданы новые схемы, в десятки раз более миниатюрные, чем транзисторные, и возникла новая область — микроэлектроника, которая позволяет собирать системы из сотен тысяч элементов. Машина, которая будет действовать не хуже глаза лягушки, скоро будет создана *.

Но если анализатору такого типа представить образы, которые ему «незнакомы», он может ошибиться. Это подтверждает наблюдение так называемых оптических иллюзий. Линии на правом рисунке 36 кажутся непараллельными из-за горизонтальной и вертикальной штриховки, хотя на самом деле они строго парал-

* Первая электронная модель глаза уже сделана М. Херцлем и Т. Келли. Сейчас существует уже несколько типов электронных моделей глаза лягушки и голубя.

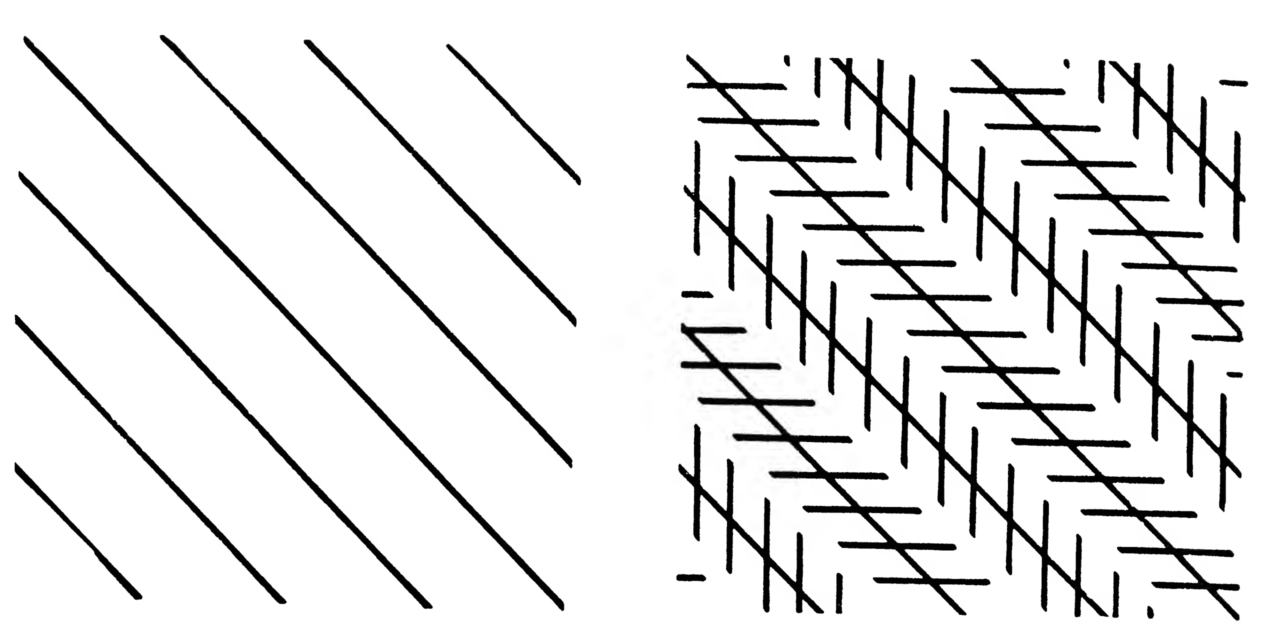


Рис. 36. Косые линии на левом рисунке параллельны. А на правом?

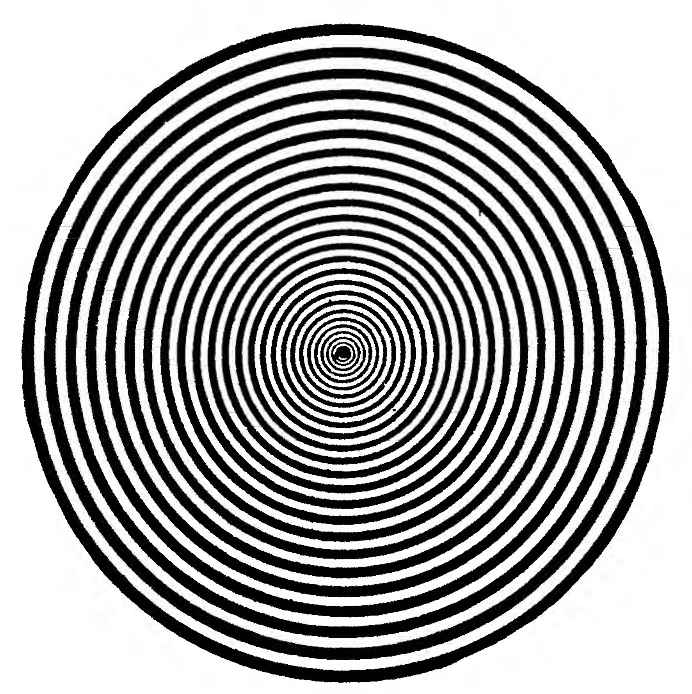


Рис. 37. Любопытная иллюзия движения при рассматривании неподвижного рисунка. Попробуйте слегка двигать книгу.

лельны, как это видно на левом рисунке, где штриховку убрали. Это — логическое последствие латерального торможения, взаимодействия восприятий соседних зон. Некоторые иллюзии еще более поразительны. Мы уже знаем, что восприятие движения основано на комбинации восприятий контраста на достаточно большой площади рецептивного поля. Но можно получить иллюзию движения, глядя на «непривычное» статическое изображение (рис. 37). Достаточно некоторое время рассматривать эту фигуру, чтобы увидеть, как рисунок приходит в движение. И если слегка смещать страницу, можно увидеть возникновение диаметральных псевдолиний и их быстрое вращение. К счастью, человеку, так сказать, не грозит встреча с подобными рисунками в повседневной жизни. Но бионик, собираясь конструировать машину-анализатор

на основе идей, возникших при изучении естественных моделей, должен заранее предвидеть возможность ошибок в тех случаях, когда машина встретит незнакомые, новые изображения.

ЦВЕТОВОЕ ЗРЕНИЕ

В восприятии цвета, так же как и в восприятии форм, существенную роль играет предварительная обработка информации в клетках сетчатки. Было бы странно, если бы то, что характерно для восприятия формы и движения, не относилось и к восприятию цвета. Восприятие цвета в большей или меньшей степени доступно многим видам животных, но, по-видимому, только обезьяна и человек могут различать все богатство оттенков заката или грозового неба. Физиологически восприятие цвета связано с тем, что в сетчатке имеются светочувствительные клетки двух типов — палочки и колбочки. Палочки воспринимают изменения освещенности, а колбочки чувствительны к цвету. В самом начале XIX столетия английский натуралист Томас Юнг, еще ничего не зная о палочках и колбочках, высказал предположение, что в сетчатке есть клетки, избирательно воспринимающие красный, зеленый и синий цвета — так называемые «основные цвета». Многие физиологические эксперименты подтвердили эту теорию, и она всегда служила основой исследований в области цвета. Эта теория нашла практическое применение в трехцветной печати и в современном цветном телевидении. В этой области, быть может, бионика не найдет ничего нового, но, если обратиться к любопытным экспериментам доктора Э. Ланда, то оказывается, что глаз воспринимает некоторые цвета, как будто бы отсутствующие в полученной зрительной информации.

Доктор Э. Ланд провел большое количество экспериментов, но мы ограничимся описанием одного из них, наиболее типичного. С какого-нибудь объекта делают два диапозитива: один — через красный светофильтр, другой — через зеленый. Их проецируют на экран двумя проекторами так, чтобы изображения точно накладывались друг на друга. Если теперь поместить перед проекторами те самые фильтры, через

которые производилась съемка, — красный перед проектором, где находится диапозитив, снятый с этим же красным фильтром, а зеленый перед проектором, где помещен диапозитив, снятый с зеленым фильтром, — получается потрясающий результат. Человек видит цвета так, как будто на экране демонстрируется один цветной диапозитив, снятый в нормальных условиях, без всяких фильтров! Но эффект сохраняется и тогда, когда красный фильтр заменяют желтым. Можно использовать просто источник желтого цвета, например лампу с парами натрия. И тот же эффект можно наблюдать, если осветить зеленый диапозитив желтым светом, в то время как красный диапозитив освещен красным светом. Этот эффект, несомненно, зависит от восприятия цвета, потому что фотография с совмещенного изображения по цвету совсем не похожа на то, что видит глаз. Удивительно интересно то, что появляется ощущение зеленого цвета, хотя освещение желтое и красное.

Трансформация желтого цвета в двух описанных случаях показывает, что выбор пар цветов при съемке и проецировании диапозитивов подчиняется определенным законам. Если принять за исходный порядок расположение спектра в радуге: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый, то цвета фильтров или ламп, применяемых при проецировании на экран диапозитивов, снятых в красном или зеленом свете, должны располагаться в том же порядке, что и пара красный — зеленый. Это верно как для первой пары (желтый — зеленый), так и для второй (красный — желтый).

Очевидно, цвета не существуют как таковые, это скорее результат сочетания двух разных цветов и восприятия этих сочетаний. На конгрессе в Дейтоне в 1963 году бионик Г. Бьернсон предложил объяснение восприятия цветов. Он считает, что это результат динамической обработки полученных светочувствительными клетками сигналов и что эта обработка вполне может происходить в слоях нейронов сетчатки. Действительно, существуют иллюзии не только черно-белого, но и цветового зрения. Есть иллюзии другого типа: если смотреть на белый свет, мелькающий с частотой примерно 10—20 раз в секунду, то мы увидим так

называемые «цвета Фехнера». Это объясняется интерференцией частот, на которых происходит динамическая обработка (согласно Г. Бьернсону), и частоты мельканий белого света — раздражителя.

Все эти работы вместе с экспериментами Э. Ланда доказывают, что восприятие цвета далеко не так просто, чтобы его можно было объяснить присутствием в глазу какого-то трехцветного чувствительного слоя. Как и восприятие формы и движения, восприятие цвета зависит от свойств составляющих сетчатку нейронов.

Эти новые идеи в области цветового зрения могут представить интересный материал для бионика. Проблема воспроизведения цвета настолько важна (вспомним хотя бы о цветном телевидении), что нужно приветствовать любую новую идею, которая может привести к созданию более совершенных машин (а упрощение — тоже усовершенствование). Бионический подход в области цветового зрения может оказаться не менее плодотворным, чем в области восприятия форм и движения.

ГЛАВА 7

МИГРАНТЫ И ПУТЕШЕСТВЕННИКИ

ЧЕМУ МОЖНО НАУЧИТЬСЯ У МИГРИРУЮЩИХ ЖИВОТНЫХ

Путешествовать свойственно не только человеку, путешествуют и животные, причем многие из них гораздо больше, чем человек. К числу животных-путешественников в первую очередь следует отнести так называемых мигрантов. На каждом континенте, в каждой стране есть свои виды перелетных птиц: все они проводят лето в умеренном климате, а с наступлением холодов улетают кормиться в более теплые страны; очень немногие виды поступают наоборот. Во время миграций, зависящих от смены времен года, обычно перемещаются огромные массы птиц. Перелеты некоторых видов — настоящие кругосветные путешествия, их пути пролегают от полюса до полюса: арктические ласточки гнездятся на севере Канады, а на зиму отправляются в Антарктику, пролетая вдоль берегов Африки. Такие путешествия наблюдали еще натуралисты Древней Греции, но только в последнее время началось настоящее научное исследование миграций. Вопросов, на которые пытаются ответить ученые, немало. По одному или группами перемещаются животные-мигранты? Быстро или медленно они двигаются? Какая часть их благополучно заканчивает путешествие и сколько гибнет в пути? Что заставляет животных предпринимать такие путешествия? И наконец, как они находят дорогу, как ориентируются в пути?

Именно последний вопрос и вызывает особый интерес бионикoв к проблеме миграций. Чтобы научиться находить путь от одного пункта к другому, научиться проверять, нет ли отклонений от намеченного курса, короче говоря, чтобы овладеть искусством навигации, люди потратили много времени и средств. Найденные решения, как бы эффективны они ни были, все еще далеки от совершенства; до сих пор целая армия инженеров и техников трудится в этой области. Ши-

рокое поле деятельности открывается здесь и для бионика. Какие органы чувств участвуют в навигации мигрирующих животных, какие механизмы вступают в действие в таких случаях? Нельзя ли на этой основе усовершенствовать наши навигационные приборы?

Как всегда, прежде чем думать о проектировании машин по природным моделям, нужно сначала хорошо изучить поведение и свойства этих моделей. Поведение мигрирующих животных лучше всего изучать методом наблюдения, отдавая безусловное предпочтение наблюдению в естественных условиях. На станциях, изучающих перелеты птиц, наблюдают за их пролетом, время от времени отлавливая несколько экземпляров для более точного определения вида. Днем вести учет пролетающим птицам не представляет особого труда, но многие птицы перемещаются только ночью, а это осложняет наблюдение. Прекрасными помощниками натуралистов оказались радары, применяемые в гражданской авиации.

На экранах радара часто появляются сигналы, отраженные от неизвестных объектов. Иногда они группируются и равномерно перемещаются в одном направлении. Эти загадочные видения до сих пор называют «ангелами». Тщательные исследования ряда ученых, в том числе доктора Иствуда, одного из пионеров радиолокации в Англии, показали, что в большинстве случаев «ангелы» — не что иное, как эхо-сигналы, отраженные от птиц. Так появилась возможность изучать и ночные перелеты, потому что радар прекрасно действует в темноте. Наблюдения при помощи радаров подтвердили прежние сведения о том, что ночные перелеты гораздо интенсивнее дневных. При помощи высокоспециализированных радаров удалось измерить высоту перелетов. Оказалось, что чаще всего птицы летят на высоте одного километра, но многие поднимаются до трех, а иногда и до шести тысяч метров.

Ученые редко наблюдают перелеты при помощи радаров, потому что постройка станции слежения обходится слишком дорого и требует большого штата техников, а средства, отпускаемые на орнитологические исследования, как правило, ограничены. Поэтому основным остается старый добрый способ — кольцевание. Этот универсальный метод позволяет собрать

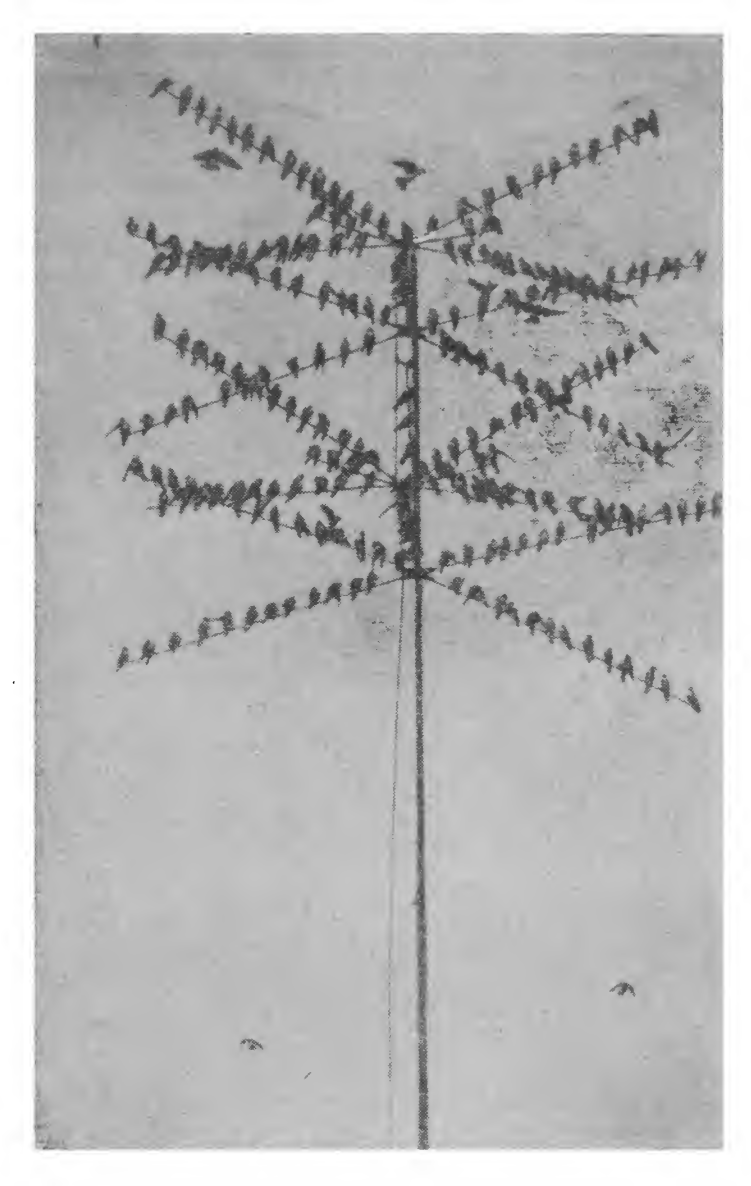


Рис. 38. Как ориентируются перелетные птицы в далеких путешествиях?

огромную массу информации. Он очень прост: птиц, предназначенных для кольцевания, ловят и надевают им на лапки кольца из легких сплавов с нанесенными на них названием организации и номером. Само по себе кольцевание — только начало. Чтобы труды не оказались напрасными, нужно снова поймать меченую птицу. Методом кольцевания удается, например, узнать, что некоторые птицы всегда возвращаются к родному гнезду.

Ежегодно кольцуют миллионы птиц, а процент их вторичного отлова колеблется в зависимости от вида. Нетрудно представить, какое количество подсчетов связано с этими операциями. Необходимо и самое широкое международное сотрудничество — ведь птицы не признают государственных границ. В последнее время обработка всех этих данных значительно облегчается применением электронных вычислительных машин.

Птицы — наиболее известные и хорошо изученные мигранты, но далеко не единственные. Известны походы европейского угря, который пересекает Атлантику и размножается в Саргассовом море на широте Бермудских островов. Есть и другие примеры. Так, морские черепахи, живущие у берегов Бразилии, тоже пересекают Атлантику и размножаются на острове Пасхи. Эти черепахи должны обладать выдающимися навигационными способностями — им нужно проделать морской путь протяженностью две тысячи километров и выйти точно к острову Пасхи — крохотному кусочку суши, затерянному в безбрежных просторах океана. В мире насекомых тоже наблюдаются массовые перемещения. Особенно сильное впечатление производят громадные тучи перелетной саранчи. Но короткая жизнь насекомых не позволяет им совершать миграции в полном смысле этого слова, то есть путь туда и обратно; они никогда не возвращаются.

Многие животные не мигрируют, но им приходится покидать свои жилища в поисках пищи. Дальше других обычно путешествуют крылатые существа. Дальность этих полетов можно оценить по достоинству, если вспомнить о размерах самих путешественников. Возьмем, например, пчел. Пчелы улетают за несколько километров в поисках нектара. Как же они находят обратный путь к улью? А как птицы находят

дорогу к гнезду? Человек издавна использовал эту способность голубей для пересылки писем. Но и другие виды птиц ставят поразительные рекорды в этой области. Пингвины, как показали новейшие исследования, обладают отличными навигационными способностями: они ориентируются среди плавучих льдов и возвращаются издалека на «свой» берег.

Перед второй мировой войной немецкий орнитолог В. Рюппель поставил многочисленные опыты с ласточками. В одном из них 21 ласточку увезли за 400 километров от дома; 11 вернулись на следующий день. В Соединенных Штатах Америки Д. Гриффин в опытах с серебристой чайкой обнаружил, что с расстояния 400 километров все птицы до одной возвращались к гнездам, а с расстояния 1400 километров вернулись 4 птицы из 6. Но рекорд принадлежит альбатросу. Несколько пар этих птиц очень мешали летчикам на базе США — острове Мидуэй в Тихом океане. Людям не хотелось их истреблять, и они пытались избавиться от них другим путем — отправить в изгнание. Но ничего не получилось, птицы возвращались домой отовсюду. Один альбатрос, которого завезли на Филиппины — за 6600 километров от родного острова, — вернулся через месяц. Другого выпустили на острове Уидби в штате Вашингтон, а через десять дней он уже был дома, преодолев расстояние в 6000 километров.

НЕКОТОРЫЕ ТЕОРИИ «НАВИГАЦИИ» ЖИВОТНЫХ

Факты показывают, что животные способны ориентироваться в пространстве. Изучение миграций животных выявило много интересных закономерностей. Некоторые ученые, в частности английский орнитолог Г. Саутерн, попытались выяснить зависимость между перемещением линий средних температур на географической карте и примерным направлением миграции одного из видов птиц. Оказалось, что эти две линии имеют одно и то же направление: птицы путешествуют так, чтобы как можно дольше оставаться в зоне постоянных средних температур. Известную роль в этих перемещениях играет и ветер — не потому, что птицы используют попутный ветер для перелетов, а потому, что он несет информацию о холоде и тепле.

Несомненно, пути миграции находятся в прямой зависимости от метеорологических условий, однако для бионика в этом нет ничего интересного.

Но дело совершенно меняется, если речь идет о путешествиях на длинные дистанции, которые животные предпринимают, чтобы возвратиться в родные места. Животным, без сомнения, присуща способность ориентироваться. Уметь ориентироваться — это значит уметь выбрать определенное направление; человек для этого применяет компас. А находить путь из одного пункта в другой точно определенный пункт — это уже настоящая навигация. Так, ориентиром самолета при выходе на посадку служит линия прожекторов на посадочной полосе аэродрома. Подводная лодка в океанских глубинах приходит в назначенный пункт, подобно альбатросу, который находит маленький островок в безбрежном Тихом океане. Не к мигрантам, а именно к путешественникам относится основной вопрос бионика: какое чувство или какая комбинация чувств обусловливает их поразительное поведение — чудесную способность возвращаться к родному гнезду? К сожалению, ответ на этот вопрос мало обнадеживает: мы убедились, что нам еще недоступно таинственное царство запахов, потому что мы не знаем, как возникает ощущение запаха. А ведь это — одно из пяти «классических» чувств. Что же тогда говорить о «чувстве навигации»? Несмотря на тщательные исследования в течение двадцати лет, несмотря на то, что разработаны довольно интересные теории, надо признаться, мы ненамного продвинулись в этой области. Есть отдельные гипотезы, ценность которых не вызывает сомнений, но определенного ответа еще нет. А это значит, что бионику еще рано надеяться, что он сможет создать навигационную систему, подобную той, которой располагает, например, почтовый голубь. Но эта тема настолько интересна (может быть, оттого, что она так таинственна?), что все-таки стоит, пожалуй, посмотреть, чего же мы достигли.

Все существующие объяснения навигационной способности животных можно подразделить примерно на три категории: 1) она не представляет собой ничего нового и основана на «классическом» восприятии форм или запаха; 2) она основана на восприятиях

известных органов чувств, но эти органы способны воспринимать невоспринимаемое (с точки зрения человека, конечно) и, наконец, 3) способность к навигации, особенно в далеких путешествиях, можно объяснить только существованием чувства, доселе неизвестного человеку.

Первая категория не требует объяснений. В отношении второй можно говорить о таких способностях, как способность воспринимать поляризованный свет. Что это такое? Когда солнечный свет отражается от какой-либо поверхности, он поляризуется, то есть световые колебания, беспорядочно отраженные во всех направлениях, приобретают определенную направленность. Этот эффект хорошо наблюдается на воде; так, отражение солнца на поверхности моря сопровождается яркими бликами. Но в очках, пропускающих только поляризованный свет (поляроидах), человек может спокойно смотреть на отражение солнца — блики исчезают. Повернув голову, можно снова увидеть эти блики. Это происходит потому, что цветные стекла очков пропускают только лучи, ориентированные в определенной плоскости, которая в данном случае близка к горизонтальной. Точная ориентация этой плоскости зависит от положения наблюдателя по отношению к солнцу. Разумеется, законы отражения действуют и тогда, когда солнце скрыто за тучами. Пчела, глаза которой чувствительны к поляризованному свету, может ориентироваться по солнцу и в пасмурную погоду. Это уже интересно для бионика, тем более что несколько лет назад появились некоторые навигационные приборы, основанные на этом эффекте, но затем о них забыли. Не рано ли? Может быть, природные модели могут еще пригодиться?

Но самая интересная для бионика — последняя категория, область неизвестных чувств. Правда, тут нужно сразу же оговориться: никогда не следует поддаваться очарованию таинственности. Прежде чем искать еще не открытое чувство, нужно испробовать все обычные возможности, даже если это приведет к заключению, что ничего нового и таинственного здесь нет.

Мы уже говорили о том, что особенности отдельных чувств непосредственно отражаются на поведении

животного. Чувству навигации, как и всем остальным чувствам, должен соответствовать свой особый мир. Значит, способы навигации должны быть так же многочисленны, как и виды животных, — вспомните наш разговор о зрительных восприятиях. По-видимому, у разных видов может обнаружиться и более глубокое различие в способах навигации, различие в принципе действия, а не в степени развития. Вполне возможно, что способы навигации, годные для малых расстояний, не имеют ничего общего со способами навигации на длинных дистанциях. Нельзя забывать

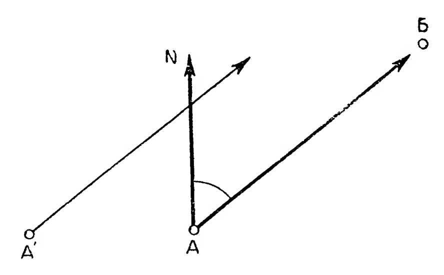


Рис. 39. Если вы находитесь не в *А*, а в *А'*, одного чувства направления недостаточно, чтобы попасть в пункт *Б*.

об этих различиях, иначе все перемешается, а поспешные обобщения приведут к окончательной путанице.

Если рассматривать только «классические чувства», то о настоящей навигации не может быть и речи — можно говорить лишь об ориентации по зрительным образам или по запахам. Животное, например, выбирает определенное направление, скажем на восток, где восходит солнце. Это ориентация в прямом смысле слова. Точно так же ориентируется человек с компасом в руках, но он все же рискует пройти мимо пункта назначения. Предположим, что для того, чтобы попасть из пункта *А* в пункт *Б* (рис. 39), нужно идти на северо-восток. Если человек находится в пункте *А'*, но считает его пунктом *А*, он пройдет мимо пункта *Б* по дороге, параллельной правильному пути из *А* в *Б*. Только в том случае, если он сумеет определить положение исходного пункта (*А* или *А'*) по отношению к пункту назначения (*Б*) и придет в этот пункт, можно употребить термин «навигация».

Как доказали многочисленные эксперименты, на небольших расстояниях многие виды птиц и насекомых находят путь по видимым ориентирам. Это вполне естественно. Горожанин почти потерял природное чувство навигации, но люди, живущие близко к природе, пользуются им ежедневно. С километровой высоты (высоты полета птиц) горизонт отодвигается на сто километров и такие ориентиры, как озера или реки, видны издалека. Птицы, в особенности голуби, обладают замечательной зрительной памятью. Но это не врожденная память, ее надо тренировать. Если переместить голубятню на новое место, то необходим довольно долгий период привыкания, пока можно будет выпускать голубей. Сначала им разрешают только выходить из голубятни в специальную вольеру с сеткой, чтобы осмотреться. Затем нескольких голубей выпускают, а других оставляют в вольере. Постепенно все обитатели голубятни, привыкнув к новому месту, получают свободу. И только тогда начинается настоящий тренинг: голубей учат возвращаться, увозя их все дальше и дальше.

Можно предполагать, что на коротких и средних дистанциях основную роль играют зрительные ориентиры. Скажем, птице знакома определенная зона (*А*) вокруг гнезда (*Г*), в пределах которой она ищет пропитание (рис. 40). Когда птицу увозят в достаточно удаленный пункт (*Б*), она выбирает направление наугад и летит по прямой. Если она сразу выберет направление *1*, то это будет самый короткий путь к гнезду. Выбрав направления, отмеченные цифрой *2*, она еще может вернуться: достигнув границ знакомой зоны, птица меняет направление и летит к гнезду. Но если птица выбрала одно из неверных направлений (*3*), она заблудится. Это объяснение кажется простым, но в опытах по изучению возвращения птиц к гнезду получен гораздо более высокий процент удач, чем можно было бы ожидать.

Наблюдатели заметили, что птицы, выпущенные в незнакомой местности, начинают кружить над землей. Предполагают, что птицы описывают при этом все более и более развернутую спираль, пока не увидят знакомые предметы в зоне *А* (рис. 41). Это требует больших затрат времени, но птицы вообще

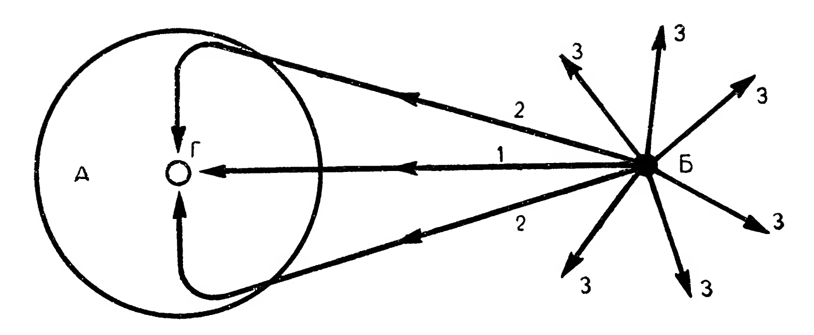


Рис. 40. Навигация на средние расстояния — сочетание случайного выбора и ориентации по знакомым ориентирам.

Г — гнездо птицы; *Б* — точка выпуска; *А* — зона, зрительно знакомая птице. *1* — направление обратного полета, ведущее прямо к гнезду; *2* — крайние положения, когда птица еще может вернуться в гнездо; *3* — направления, выбрав которые птица не возвращается.

Рис. 41.

Г — гнездо птицы; *Б* — точка выпуска; *А* — зона, зрительно знакомая птице.

возвращаются довольно медленно. Резюмируя многочисленные опубликованные результаты, профессор Ж. Дорст из Национального музея естественной истории в Париже считает, что птица, возвращаясь к гнезду, за день проделывает путь, на который требуется всего один час прямого полета. Спираль, изображенную на рис. 41, никто не наблюдал, но это еще не значит, что птицы не пользуются довольно упорядоченным изучением местности. Наблюдения, проведенные Д. Гриффином с самолета, подтверждают это предположение. Современная техника позволяет выяснить точную траекторию полета птицы, если снабдить ее перед вылетом миниатюрным радиопередатчиком. Наблюдения с двух разных точек позволяют точно засечь положение передатчика в пространстве. Некоторые

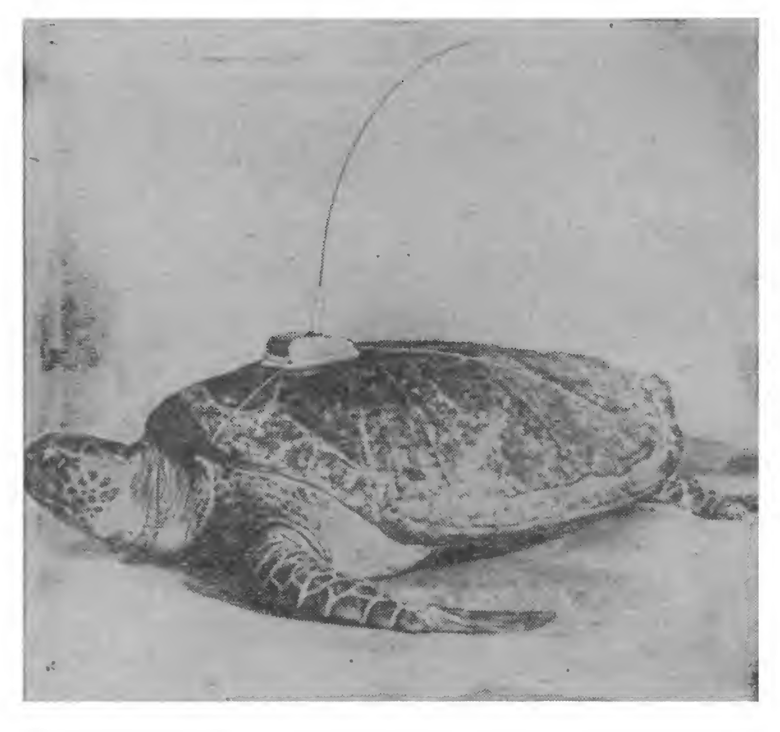


Рис. 42. Маршрут мигрирующей черепахи можно проследить при помощи маленького радиопередатчика.

попытки уже сделаны, но все эксперименты пока проводились только на крупных птицах, так как вес передатчика и длина антенны создают дополнительные трудности. Правда, можно сделать миниатюрные передатчики, но вес батарей питания остается еще большим. Предполагалось с целью питания приемника использовать собственное электричество птицы (например, нервные импульсы), но это трудно осуществить. Кроме того, на земле должна находиться целая сеть станций, чтобы постоянно следить за сигналами передатчика. В 1964—1965 годах М. Миченер и С. Уолкотт проводили эксперименты с почтовыми голубями. Вес передатчика достигал 28 граммов, снаряжение, на котором он был укреплен, весило около 2 граммов. Чтобы ловить сигналы передатчика, надо было следовать за птицей на маленьком туристском самолете. А что делать, если придется лететь над океаном, следуя, например, за черепахами от берегов Бразилии до острова Пасхи? К счастью, эти животные достаточно сильны, чтобы нести на себе более мощный передатчик, питание и антенну. Существует интересный проект, предусматривающий наблюдение за черепахами со специально оборудованного спутника. Радиосвязь в данном случае может быть вполне эффективна, потому что плывущие черепахи периодически поднимаются на поверхность.

Не дожидаясь, пока этот новый метод* исследования полностью разъяснит вопрос, находит ли птица свое гнездо случайно или в результате систематического исследования местности, вспомним, что случаи рекордно быстрого возвращения к гнезду позволяют предполагать действие каких-то других факторов. Именно мысль об этих неизвестных факторах заставляет сильнее биться сердце бионика. Но может быть, здесь все дело в простом чувстве ориентации, как у человека с компасом? Эксперименты Рюппеля с воронами очень убедительны в этом смысле. Все происходило так, как показано на рис. 39. Вороны обычно мигрировали из пункта *А* в пункт *Б*. 900 ворон

---

* Этот метод получил название радиотелеметрии. Он широко используется в последние годы при изучении миграции и ориентации животных.

поймали в пункте A, в городке Розиттен на Балтийском море, перевезли за 750 километров к западу и выпустили во Фленсбурге (в пункте A'). И вороны полетели в обычном направлении, но вместо того, чтобы сесть на берегах Балтики, обосновались на юге Швеции. Эти опыты показали, что вороны способны выбирать правильное направление, но найти нужную местность они не могут, а это значит, что у них отсутствует чувство навигации.

Как птицы определяют направление? Возможно, по солнцу. Защитники этой теории — Г. Крамер в Германии и Г. Мэттьюз в Англии — помимо наблюдений за птицами на свободе проводили эксперименты в клетке. Если животное способно определить, где восходит солнце, то оно сохраняет правильное направление в течение всего дня, даже если солнце закрыто тучами. Значит, животные должны иметь какие-то внутренние часы, при помощи которых они определяют время с момента восхода солнца. Зная скорость видимого движения солнца, они могут постоянно вносить поправку в наблюдение. Эксперименты подтверждают это предположение.

Это чувство времени весьма точно. Само по себе наличие биологических часов — широко известное явление. Мы всегда просыпаемся примерно в одно и то же время, но после дальнего перелета, например из Европы в Америку, происходит нарушение биологического ритма; нужно несколько дней, чтобы перестроить свои биологические часы и восстановить ежедневный ритм.

Но труднее всего поверить, что биологические часы настолько точны, чтобы обеспечить настоящее чувство ориентации — способность наблюдать видимое положение Солнца в каждый данный момент и вносить соответствующую поправку на его кажущееся движение. И от этих часов требуется еще большая точность, если речь идет не о простой ориентации, а о навигации.

Когда моряк прокладывает курс по солнцу, он пользуется наиболее точными часами — хронометром. Ровно в полдень по местному времени солнце находится в самой высокой точке над горизонтом. Хронометр показывает не местное время, а время в опреде-

ленной точке отсчета; моряк узнает разницу во времени между этой точкой и точкой, где он сейчас находится; 24 часа соответствуют земной окружности, 12 часов — половине ее, и так далее. Разница во времени дает цифры, которые определяют долготу, или расстояние по окружности, параллельной экватору, между данной точкой и точкой отсчета. Разница в один час между двумя точками соответствует одному градусу долготы. Широту, или расстояние до экватора, можно определить по высоте солнца в полдень. Чтобы птица могла узнать разницу в широте между двумя пунктами (гнездом и местом, где она выпущена), ее биологические часы должны быть удивительно точными. Опыты, проведенные Дж Эмлином и Р. Пенни, показывают, что и пингвины ориентируются по солнцу. Эти интересные существа могут неделями обходиться без пищи. Большинство из них возвращалось к родному берегу с расстояния двести с лишним километров. Но когда небо было закрыто облаками, пингвины теряли способность ориентироваться.

Ориентация по солнцу (или по звездам, потому что многие птицы летят ночью, когда солнца нет), по-видимому, играет важную роль, но все же она далеко не так универсальна, как думали раньше.

ВОСПРИЯТИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Быть может, неизвестные нам чувства все же существуют. Эта мысль не нова. Изобретение компаса положило начало целой серии географических открытий. Еще задолго до Колумба древние викинги пользовались куском магнитной руды в путешествиях к Винланду (нынешний Бостон и его окрестности). Вполне естественно предполагать, что птицы непосредственно воспринимают магнитное поле. В 1882 году француз С. Вигье высказал эту мысль в «Философском обозрении»; с тех пор она иногда всплывала на поверхность, но ничего нового в этой области не появлялось.

Магнитное поле Земли напоминает поле постоянного магнита. Магнитная стрелка всегда указывает на север — это первое определение направления. Но если стрелка свободно движется еще и вокруг гори-

зонтальной оси, ее склонение по отношению к горизонту указывает широту места. На экваторе это склонение равно нулю; на полюсе стрелка располагается перпендикулярно к горизонту. Теоретически возможна навигация на чисто магнитной основе. Этого вполне достаточно, если, как предположил Г. Игли, птица воспринимает определенные воздействия, связанные одновременно с ее собственным движением и с ее перемещением относительно земного экватора.

Игли попытался подкрепить свою теорию экспериментами, которые считаются очень важными. Но истолковать их трудно, потому что он не учел один известный факт: поблизости от гнезда птица все же пользуется видимыми ориентирами. Другие экспериментаторы много раз старались доказать, что в основе чувства ориентации лежит восприятие магнитного поля, но до тех пор, пока не будут получены определенные результаты, нельзя утверждать, что птицы пользуются чем-то вроде компаса. Сейчас, однако, нет достаточных оснований и для того, чтобы полностью отказаться от магнитной гипотезы.

Многие ученые вообще не хотят соглашаться с тем, что живое существо может непосредственно воспринимать магнитное поле. Недавно французский профессор И. Роккар предположил, что феномен, известный как поиски воды с помощью «волшебного прута» *, связан с нарушениями магнитного поля вблизи подземных вод. Это вызвало бурю протестов, а наиболее яростные противники даже отказались проводить эксперименты, предложенные профессором Роккаром. Зачем их повторять, если результаты можно заранее объявить абсурдными? Такое отношение совершенно чуждо бионику, который должен обладать безграничной любознательностью. Разумеется, не нужно путать любознательность и легковерие; за пределами своей узкой специальности всегда можно ошибиться или дать ввести себя в заблуждение, но задача

* Автор касается спорного феномена, связанного с поисками грунтовых вод и заключающегося в том, что будто бы вблизи грунтовых вод изменяется положение сухой деревянной палочки (прута) или легкой металлической рамки, которую свободно держит в руках человек.

бионики именно в том, чтобы объединить авторитетных специалистов из разных областей и свести этот риск к минимуму.

Воспринимается не само магнитное поле, а отдельные его нарушения. Эти нарушения вызывают эффект электромагнитной индукции и появление электрического напряжения, которое может путем прямого действия на нервные клетки деполяризовать их и дать некоторую чувственную информацию. Значит, вовсе не абсурдно заранее предполагать, что в полете птицы могут воспринимать магнитное поле. Еще один довод в пользу этой гипотезы: голуби, когда их выпускают, начинают летать кругами и только после этого выбирают направление. Может быть, именно так они определяют направление магнитных линий.

Иногда эту вероятную восприимчивость птиц к действию магнитного поля старались подтвердить или отвергнуть при помощи довольно наивных экспериментов. Слово «магнитное» натолкнуло некоторых исследователей на мысль проверить, как действуют на птиц электромагнитные волны радара, хотя эти явления не имеют между собой ничего общего. С тем же успехом можно проверять, как действуют электромагнитные волны радара на лампочку карманного фонарика.

Все-таки некоторые эксперименты позволяют предполагать, что животные воспринимают магнитное поле. Речь идет о морских моллюсках довольно примитивного строения, опыты над которыми проводил американский зоолог Ф. Браун. Он поместил улиток в садок с единственным выходом. Обычно животные направлялись прямо к выходу. Помещая садок в магнитное поле, более сильное, чем поле Земли, профессор Браун заметил, что направление движения улиток меняется. Эти изменения движений животного были связаны определенной зависимостью с силой магнитного поля и с его направлением.

Подведем итоги. Навигация животных-путешественников и мигрантов в значительной степени опирается на информацию, полученную органами чувств, и основана на узнавании видимых объектов или знакомого запаха. В некоторых случаях возможна ориентация по положению солнца. Иногда используются незнакомые нам чувства, например непосредственное

восприятие магнитного поля Земли. Инженер-бионик предложит своему коллеге-биологу исследовать этот вопрос как можно глубже, и, каков бы ни был ответ, совместная работа безусловно поможет изучению животных-путешественников. И вполне возможно, что она станет основой для создания новых машин и приборов.

Глава 8

ПРИРОДНЫЕ РАДАРЫ

ПРОИСХОЖДЕНИЕ РАДАРА

Искать пищу, спасаться от врагов и продолжать свой род — вот три основных вида деятельности любого животного. Эти три вида деятельности и составляют жизненно важное поведение животного, на которое, как мы уже знаем, влияют ощущения, полученные при помощи органов чувств. Многие животные ищут добычу, так сказать, пассивными методами: они либо видят движение своей жертвы, либо ждут, когда та обнаружит себя. Очень часто присутствие дичи выдает ее запах. А гремучая змея улавливает тепловое излучение неосторожно приблизившейся к ней мыши. Во всех этих случаях восприятие можно назвать пассивным в том смысле, что животное, воспринимающее ощущения, не имеет никакой возможности повлиять на характер физического явления, несущего соответствующую информацию. Во власти живого существа только одно — как можно лучше приспособиться к внешней среде, чтобы получить от нее максимум информации.

Часто и человек попадает в такое же положение. Например, когда он слышит шум самолета, то смотрит в небо, чтобы найти этот самолет. Это чисто пассивное наблюдение. Если же самолет летит со сверхзвуковой скоростью, то он уже далеко за горизонтом, когда до человека доходит звуковая волна. А если небо закрыто тучами, через них не много увидишь! Чтобы преодолеть эту ограниченность чисто пассивного восприятия, человек изобрел радар, который позволяет издалека обнаруживать самолеты независимо от их скорости и метеорологических условий — туч, дождя, тумана. Радар предполагает активный метод наблюдения. Зная все физические характеристики данного прибора, их можно улучшать, устранив таким образом недостатки пассивных методов наблюдения.

Принципиальная схема радара изображена на рис. 43. Передатчик (*А*) излучает электромагнитный

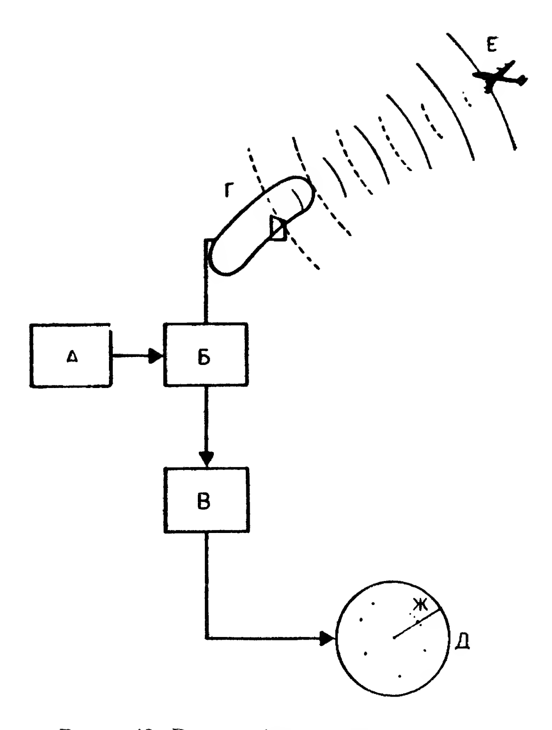


Рис. 43. Радар обнаруживает самолет.

А — излучатель; *Б* — дуплексер; *В* — приемник; *Г* — антенна; *Д* — экран наблюдения; *Е* — обнаруженный самолет; *Ж* — последовательно отраженные от самолета сигналы.

сигнал высокой частоты, порядка нескольких миллиардов колебаний в секунду. Этот сигнал представляет собой очень короткий импульс длительностью от нескольких десятимиллионных до миллионных долей секунды. Мощность этого сигнала достигает тысяч киловатт, но из-за его кратковременности расход энергии сравнительно невелик и не превышает мощности, которую может дать двигатель автомашины. Импульсы передаются в пространство в виде электромагнитных волн, излучаемых антенной (*Г*), которая представляет собой большое металлическое зеркало, действующее по принципу прожектора. Эти волны распространяются в пространстве и при встрече с металлическим препятствием, например с самолетом (*Е*),

некоторая часть этих волн отражается от него во всех направлениях, в том числе и в направлении излучающей антенны. Понятно, что антенна получает сигнал меньшей мощности, так как происходят огромные потери энергии на преодоление пути туда и обратно. Поэтому сигнал усиливают; роль усилителя играет приемное устройство (*В*).

Скорость распространения электромагнитных волн велика — 300 тысяч километров в секунду. Но как бы велика ни была эта скорость, ее всегда можно измерить. 100 километров (туда и обратно) сигнал проходит за 667 миллионных долей секунды. Возвращенный сигнал, таким образом, четко отделен от излученного; этот возвращенный сигнал и называют эхо-сигналом. Если измерить с точностью до миллионной доли секунды время от излучения сигнала до приема эхосигнала, можно узнать приблизительно (до 150 метров) расстояние до объекта, от которого сигнал отразился. Очень простая визуальная система (*Д*), аналогичная приемной трубке телевизора, позволяет по видимому положению эхо-сигнала на экране определить расстояние до соответствующего самолета. Антенна постоянно вращается, захватывая все окружающее пространство, и по эхо-сигналу на каждом обороте можно проследить курс самолета (*Ж*). Специальное устройство (*Б*), называемое дуплексером, позволяет присоединить антенну то к излучателю, когда он посылает сигнал, то к приемнику.

Радары появились незадолго до второй мировой войны и были значительно усовершенствованы в годы войны. Но идея обнаружения препятствий по серии отраженных сигналов родилась гораздо раньше. В 1912 году англичанин Л. Ричардсон предложил использовать для этой цели звуковые волны. Аналогичные идеи высказаны в патенте, взятом в январе 1913 года американцем Р. Фессенденом. К этим примерам применения бионики до ее рождения можно присовокупить еще и высказывание сэра Хайрама Стивенса Максима (изобретателя пулемета «Максим») в «Сайентифик Американ» 7 сентября 1912 года. По его мнению, летучие мыши избегают препятствий, используя эхо; он добавил, что на этой основе можно сконструировать прибор для обнаружения айсбергов.

В то время были еще свежи воспоминания о трагической гибели «Титаника» и лучшие умы старались найти средства для предотвращения подобных катастроф.

МЕХАНИЗМ ЭХО-ЛОКАЦИИ У ЛЕТУЧИХ МЫШЕЙ

История открытия природного радара летучей мыши стоит того, чтобы о ней рассказать. Первые научные исследования этого вопроса относятся к эпохе Великой французской революции. В 1793 году аббат Ладзаро Спалланцани, профессор биологии университета в Падуе, заинтересовался способностью летучих мышей уверенно летать в темноте. За год наблюдений он пришел к выводу, что эти животные обладают доселе неизвестным людям чувством. Как было принято в те времена, он написал об этом нескольким крупным ученым, чтобы обсудить с ними свои выводы. Его идеи встретили поддержку С. Журена, члена Общества натуралистов в Женеве, который продолжил исследования Спалланцани и обнаружил, что полет летучей мыши связан со слухом: если залепить ей уши воском, она начинает натыкаться на препятствия. Спалланцани усовершенствовал методику этих опытов и повторил их. До своей смерти, которая последовала в 1799 году, он успел убедиться в том, что летучие мыши ориентируются в темноте при помощи слуха. По его мнению, они издают в полете какой-то звук, который отражается от близких препятствий и позволяет летучей мыши вовремя избежать столкновения.

Но одно оставалось загадкой: летучие мыши летают совершенно бесшумно; вряд ли они кричат в полете, потому что людям эти воображаемые крики не слышны. Так ученые столкнулись с чем-то сверхъестественным. Именно по этой причине Кювье, профессор Музея естественной истории в Париже, категорически отверг все выводы Журена и Спалланцани. Он полагал, что выключение слуха у летучих мышей просто нарушает их нормальное поведение. Главную роль, по его мнению, играет не слух, а осязание. Кювье немилосердно издевался над предположением, что можно «видеть ушами». Он даже отказался проводить какие-либо эксперименты. И его авторитет был настолько велик, что более ста лет наука топталась

на месте, прежде чем появились звуковые радары, или, как их сейчас называют, сонары. Эта интеллектуальная инертность Кювье поначалу вызывает возмущение, желание обвинить его в противодействии прогрессу. Но ведь этот человек не был невеждой. И у него были веские причины для недоверия: не мог же он поверить в существование звуков, которых никто не слышал. Тогда еще не знали, что бывают не слышные человеку звуки — слишком высокие или слишком низкие для человеческого слуха. Когда сэр Хайрам Стивенс Максим снова заговорил об эхосигналах летучих мышей, он думал, что это очень низкие звуки, производимые взмахами крыльев. В действительности звуки, издаваемые летучими мышами, оказались не слишком низкими, а слишком высокими: это не инфразвук, а ультразвук.

Первым эту идею высказал в 1920 году английский ученый Г. Хартридж; сам он был нейрофизиологом, но ему были известны и работы, проведенные во время первой мировой войны французским физиком П. Ланжевеном. Ланжевен получил патент в 1916 году на изготовление прибора для дистанционного обнаружения подводных объектов при помощи сконструированных им генераторов ультразвука. Но только в 1938 году Гриффин экспериментально доказал, что летучие мыши издают ультразвук. Он использовал в своих опытах созданную Г. Пирсом специальную аппаратуру.

Мы так подробно излагаем всю историю открытия эхо-локации у летучих мышей потому, что она является хорошим доказательством творческих возможностей бионики.

Хартриджу пришлось заняться акустикой и физиологией слуха, изучить работы по эхо-локации подводных лодок, чтобы дать рациональное объяснение этому явлению. Предложенная им модель была неверна, но она все-таки принесла пользу, так как привела к экспериментам Гриффина. Чтобы эти эксперименты удались, понадобилось сотрудничество зоолога, знатока летучих мышей, и физика, который сконструировал подходящий микрофон и усилители. Сотрудничество представителей разных наук сыграло решающую роль на второй стадии открытия природного радара летучих мышей. Нужно продолжать и развивать

плодотворное сотрудничество в этой области. Во всех странах над проблемами радара и его акустического аналога, сонара, работает такое множество инженеров, что было бы очень неплохо, если бы часть своего времени они посвятили изучению новых живых моделей; не исключено, что это приведет к новым интересным открытиям.

До сих пор мы говорили только о летучих мышах, но эхо-сигналы для ориентации или поисков добычи

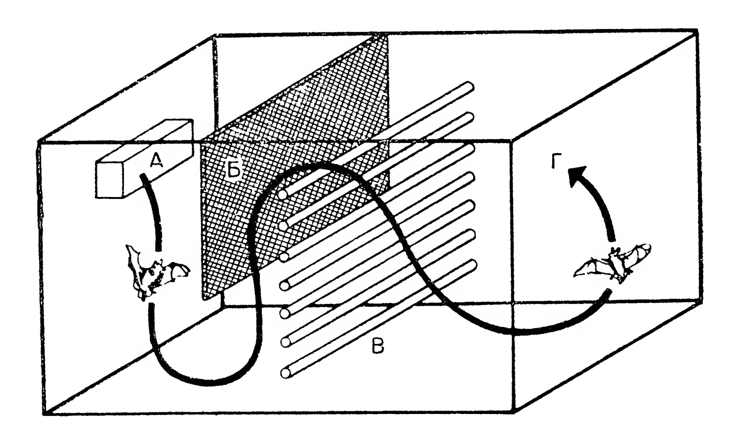


Рис. 44. В специальном помещении изучается способность летучей мыши избегать препятствий.

А — пункт выпуска; *Б* — отражающий экран; *В* — ряд планок; *Г* — зона свободного полета.

используют и другие животные. С некоторыми из них мы еще встретимся, но и это будет далеко не исчерпывающий список. Несомненно, обладателей природных радаров немало. Просто о существовании их никто не знает, и только поэтому они еще не изучены. Но уже сейчас многочисленные экспериментальные данные дают бионику очень ценные материалы для совершенствования искусственных радаров и систем обнаружения. И, как всегда, прежде чем копировать природные модели, их нужно изучить. Сотрудничество представителей разных наук должно привести к новым достижениям в области изучения природных механизмов эхо-локации.

Но пока что летучая мышь изучена лучше других животных, поэтому продолжим разговор о ней. Самые интересные эксперименты касаются способности летучих мышей избегать препятствий. Один из типичных опытов показан на рис. 44. Летучей мыши предстоит поймать добычу в зоне *Г*, где достаточно места для полета. Ее выпускают в точке *А*, и, прежде чем попасть в зону *Г*, она должна обогнуть отражающий экран *Б* и пролететь между планками *В*. Обычно для летучей мыши это не представляет трудностей. Один и тот же «радар» позволяет летучей мыши не только избегать крупных препятствий, в том числе планок, но и ловко хватать мелких насекомых. Природный радар дает достаточно подробную информацию, которая позволяет различать эхо от неподвижных препятствий и эхо от движущихся объектов (при этом надо заметить, что и те и другие перемещаются по отношению к летучей мыши, находящейся в постоянном движении). Это, без сомнения, очень интересно для инженера, изучающего радары: почти невозможно обнаружить самолет, летящий близко к земле, потому что сигналы, отраженные самолетом и поверхностью земли, практически неотличимы. Приходится прибегать к сложным приемам, чтобы разделить эхо самолета — движущегося объекта — и сигналы, отраженные неподвижной землей. Вполне естественно, что бионику захочется узнать, не принесет ли изучение летучих мышей какие-нибудь новые способы решения этой сложной задачи.

Еще один интересный факт: летучие мыши обычно живут в пещерах и, вылетая из них, пользуются своим природным радаром. Значит, масса летучих мышей одновременно издает крики, но эти крики, по-видимому, не заглушают друг друга. Лабораторные эксперименты с отдельными летучими мышами показали, что ультразвуковой шум значительной силы почти не влияет на их поведение. Но ведь проблема устранения паразитных сигналов всегда была очень острой и на ее разрешение при постройке радаров все еще уходит много времени и средств. При использовании радаров для военных целей противник часто старается нарушить работу чужих установок, направляя на их антенны излучения паразитных сигналов; в этом

случае говорят, что противник «глушит» радар. Придумали даже термин «электронная война», который определяет всю эту сложную систему нападения при помощи шумовых сигналов и способов защиты — экранирования принимающих устройств радара. Возможно, бионика еще скажет свое слово в этой области.

Научиться глубоко понимать принципы действия природного радара летучих мышей было бы действительно очень интересно. Кстати, как бы занимательны ни были эксперименты по «преодолению препятствий», они не дают удовлетворительных результатов. Летучая мышь летает со скоростью несколько метров в секунду и при такой скорости почти мгновенно меняет направление полета. Если она обогнула препятствие, это еще не дает никаких сведений о том, на каком расстоянии она его заметила. Лучше всего было бы создать в лаборатории условия, как можно более близкие к естественным условиям охоты. А это гораздо легче задумать, чем осуществить. Не следует забывать, что видов летучих мышей очень много и что сигналы ночницы (зоологи назвали ее *Myotis lucifugus*) сильно отличаются от сигналов подковоноса (*Rhinolophus*). Так что результаты, полученные в опытах с одним видом, еще не дают основания для обобщений.

Несколько лет назад Д. Гриффин, Ф. Вебстер и С. Майкл провели эксперименты, которые можно назвать практически безукоризненными. При помощи фотокамер они фиксировали с двух заданных точек в каждый данный момент времени положение летучей мыши и преследуемого ею насекомого. Таким образом, для каждого объекта — летучей мыши и ее жертвы — получали два пересекающихся направления визирования. Как показано на рис. 45, эти два направления пересекаются в точках, которые отвечают положению летучей мыши (*Б*) и насекомого (*А*) в определенный момент. Проведя сложный геометрический анализ, можно установить точные координаты летучей мыши и ее жертвы и последовательные изменения разделяющей их дистанции. Одновременно регистрируются издаваемые летучей мышью крики. Конечно, успех опыта зависит от выбора животных, потому что не все животные одинаково хорошо привыкают к охоте в

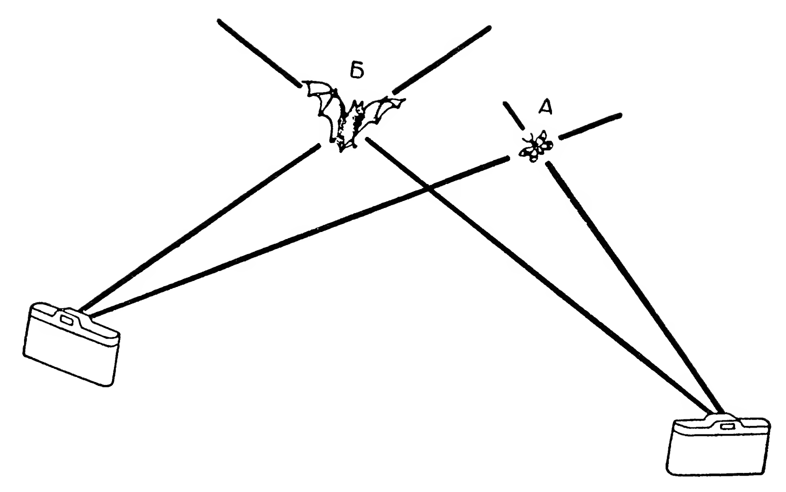


Рис. 45. Локализация полета летучей мыши (*Б*) и ее жертвы (*А*) с помощью двух фотокамер.

замкнутом пространстве. Гриффин, например, брал для опытов один из видов ночниц, *Myotis lucifugus*, маленькую коричневую мышь из семейства гладконосых летучих мышей, широко распространенную в Америке, и близкий к ней вид *Eptesicus fuscus* из того же семейства. Что же он наблюдал?

В обычном полете ночница испускает в среднем десять сигналов в секунду. Продолжительность этих сигналов очень мала: примерно три тысячных доли секунды. Они отдаленно напоминают звуки, которые издает человек, прищелкивая языком, поэтому специалисты назвали их «щелчками». За три тысячные секунды звук успевает пройти (туда и обратно) около 50 сантиметров. По странному совпадению примерно как раз на расстоянии 50 сантиметров от насекомого поведение летучей мыши меняется: частота сигналов резко возрастает и животное, меняя направление полета, бросается прямо на свою жертву. В тот момент, когда летучая мышь настигает добычу, она испускает серию коротких сигналов — длительностью около тысячной доли секунды и частотой от 100 до 200 сигналов в секунду. Звукозапись поведения летучей мыши (рис. 46) показывает, что все это происходит менее

чем в полсекунды. Оказалось, что в экспериментах Гриффина летучая мышь ловила двух насекомых в секунду одно за другим. Д. Каландер (Массачусетский технологический институт) тоже провел детальное исследование сигналов, издаваемых летучей мышью на разных фазах полета: начальная фаза — поиск добычи, промежуточная — обнаружение и последняя фаза — преследование и поимка. Он доказал, что частота ультразвуковых сигналов сильно варьирует от начала до конца серии. Надо отметить, что частота

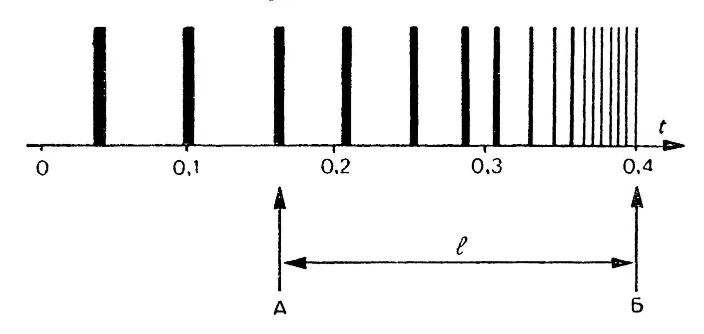


Рис. 46. Запись сигналов, которые летучая мышь испускает во время преследования насекомого.

t — время в десятых долях секунды; *А* — добыча в поле «зрения»; *Б* — добыча схвачена; *l* — расстояние, на котором происходило преследование (около 50 сантиметров).

этих сигналов очень незначительна по сравнению с теми, которые используют в радарных установках аэропортов: сто тысяч и десять миллиардов в секунду. Но и скорость распространения этих волн в воздухе неодинакова: 340 метров в секунду — для звука и 300 000 километров в секунду — для электромагнитных волн. Оказывается, что очень важная качественная характеристика — длина волны, измеряемая расстоянием, которое пройдено в воздухе во время одного колебания, — в обоих случаях почти одинакова: 3,4 миллиметра для природного радара и 30 миллиметров для искусственного. Здесь летучая мышь даже имеет некоторое преимущество. Кроме того, у нее длина волны варьирует в пределах одного сигнала от 3,4 до 7 миллиметров. Ни один созданный человеком радар не обладает этой особенностью, а вполне возмож-

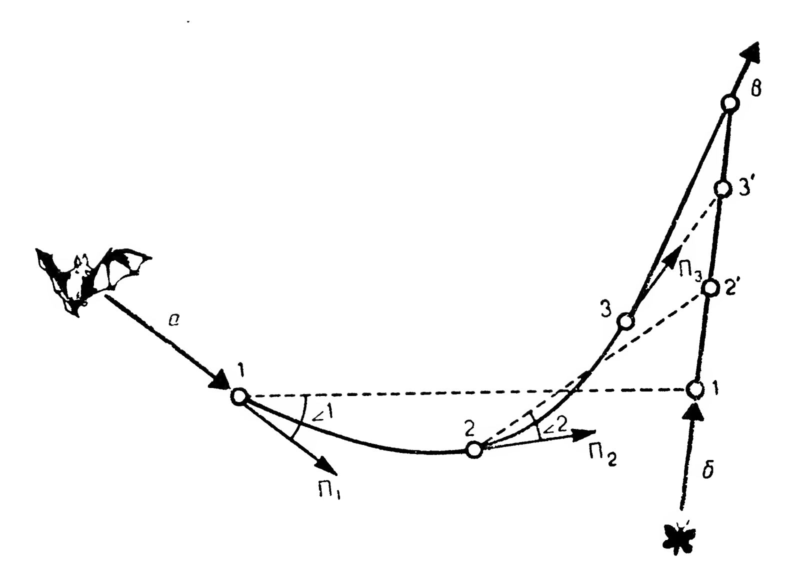


Рис. 47. Летучая мышь преследует свою добычу.

а — траектория полета летучей мыши: *1, 2, 3* — последовательные положения, *П1, П2, П3* — последовательные направления полета, ∠*1*, ∠*2* — угол между направлением на цель и направлением полета; *б* — траектория преследуемого насекомого: *1', 2', 3'* — последовательные положения насекомого в полете; *в* — точка, в которой летучая мышь настигла насекомое.

но, что именно здесь и таится причина удивительной эффективности радара ночницы. Во всяком случае, эта способность резко менять частоту сигнала — еще одна загадка природы, разгадка которой может дать интересные результаты.

Радары, сделанные человеком, обычно измеряют расстояние до объектов, от которых отразилось эхо. Легко предположить, что летучая мышь тоже в каждый данный момент измеряет расстояние до намеченной жертвы при помощи своего природного радара. Но для этого потребовался бы механизм, который позволял бы издавать звуки с частотой в тысячные доли секунды. В природе мы не знаем примеров таких частот. Да и нужно ли летучей мыши определять, на каком расстоянии от нее находится жертва? Это совершенно ни к чему. Она использует принцип наводки автоматических орудий, как это показано на рис. 47. Если в каждый данный момент ее полет направлен

прямо на жертву, она ее обязательно настигнет. В артиллерийской практике этот принцип так и называется: «преследование по собачьей кривой». Для этого достаточно, чтобы летучая мышь в каждый данный момент оценивала угол между траекторией своего полета и направлением прямо на жертву. Летучая мышь корректирует свой полет так, чтобы уменьшить этот угол, и ей совсем не обязательно точно знать величину угла: достаточно определить, где находится жертва — справа или слева, выше или ниже. Как летучая мышь определяет этот угол?

Эксперименты показывают, что для этого летучая мышь использует оба уха. Человек при помощи двух ушей сравнительно хорошо определяет положение источника звука. Если этот источник расположен не перпендикулярно к воображаемой линии, соединяющей оба уха, звук доходит до обоих ушей не одновременно. Воспринимая эту разницу, человек узнает, с какой стороны находится источник звука — справа или слева. Вполне возможно, что летучая мышь поступает так же. Ее ушные раковины относительно больше, чем у человека (это оценивается отношением величины ушной раковины к длине волны сигнала).

Детальное изучение уха летучей мыши обещает открыть еще много интересного. Ведь летучей мыши недостаточно знать, справа или слева находится добыча, ей нужно еще определить, вверху она или внизу. Каландер выдвинул предположение, что у ночниц эта способность связана со сложным строением ушной раковины, которая избирательно отражает сигналы разной частоты. Обычный радар-излучатель (рефлектор) имеет форму параболоида и отражает все сигналы в одном направлении независимо от их частоты. Ухо летучей мыши, представляющее собой избирательный отражатель, наоборот, может отражать сигналы в различных направлениях в зависимости от их частоты. И действительно, животное посылает сигнал, в пределах которого частота сильно варьирует. Недавно предложено создать радары, использующие этот принцип: сигнал с переменной частотой и антенну, сделанную по диаграмме избирательного излучения, чтобы определять направление на объекты. Здесь бионика может создать прекрасную модель. Однако следует



Рис. 48. Эта летучая мышь обнаруживает рыбу по плавнику, показавшемуся на поверхности воды.

признать, что ушная раковина летучей мыши далеко не так точно сконструирована, как отражатель радара, и что гипотеза, высказанная Каландером, вызывает сомнение у зоологов.

Другие летучие мыши — подковоносы, названные так за своеобразную форму мордочки, — используют радары совершенно иной конструкции. Они издают относительно долгие сигналы (порядка десятой или двадцатой доли секунды). Это сигналы низкочастотные, всего несколько импульсов в секунду, и частота их остается постоянной в течение всего времени преследования жертвы. При этом ультразвуковая частота не меняется от начала и до конца сигнала. Механизм локализации, описанный выше, здесь не может иметь места. Верно. Но вот что любопытно: когда подковоносы охотятся, их ушные раковины довольно заметно и быстро вибрируют, делая десятки колебаний в секунду. Оказалось, что эта вибрация играет существенную роль при поимке жертвы. Возможно, динамическое сканирование пространства

необходимо животному, которое лишено способности издавать варьирующий по частоте сигнал и не имеет уха, похожего на антенну с избирательным излучением?

Кроме этих двух основных систем — радаров типа ночницы и подковоноса — есть и другие, которыми пользуются летучие мыши других видов, но о них имеются только отрывочные сведения и не проведено ни одной законченной серии опытов, подобных опытам Гриффина. Один из видов летучих мышей питается не насекомыми, а мелкими рыбками. Животные замечают рыбок, когда те поднимаются почти к самой поверхности, точнее — когда их плавники слегка показываются над водой. Р. Сазерс, проводивший эксперименты с этими животными, заметил, что они способны отличать одну мишень от другой и узнают мишень, напоминающую плавник рыбы.

РАДАРНЫЕ СИСТЕМЫ ДРУГИХ ЖИВОТНЫХ

Хотя летучие мыши и стали предметом наиболее детального изучения, они далеко не единственные обладатели природных радаров. Сходный механизм используют многие китообразные, в том числе дельфины. Еще древние греки заметили, что эти игривые существа с удовольствием следуют за людьми и издают ясно слышные для человека звуки. Но только во время второй мировой войны, когда системы акустического прослушивания подводных лодок получили широкое распространение, стало понятно, как шумно ведут себя эти млекопитающие. Похоже даже на то, что они разговаривают друг с другом. Но для розыска добычи они применяют другие, очень короткие сигналы, как и летучие мыши. Сейчас еще рано говорить о деталях, но в сигналах дельфина уже обнаружены такие же вариации частот, какие показаны на рис. 47. Подобно летучей мыши, дельфин прекрасно отличает препятствие, которое надо обойти, от добычи, которую надо догнать и схватить. Результаты уже начавшихся во многих странах исследований живо интересуют биоников: они могут принести новые идеи в области локации.

Кроме летучей мыши и дельфина, есть и другие животные, использующие природные радары, но их изучение носило фрагментарный характер и основывалось главным образом на наблюдениях. Например, птицы гуахаро (*Steatornis caripensis*), обитающие в пещерах Венесуэлы, издают щелчки длительностью всего в тысячные доли секунды; при помощи этих сигналов птицы направляют свой полет в глубине пещер, где они гнездятся. Стрижи саланганы давно известны гурманам, которые лакомятся их гнездами. Эти птицы часто поселяются в пещерах и используют тот же механизм локации, что и гуахаро. Издают ультразвуки и некоторые грызуны. Е. Гулд в Тюлейнском университете штата Луизиана проводил опыты с землеройками. Эти грызуны должны были в полной темноте перепрыгнуть с одной большой вращающейся платформы на другую, маленькую и неподвижную, расположенную несколько выше первой. Для этого необходимо было определить положение второй платформы. Гулд отметил, что во время поиска землеройки издавали ультразвуковые импульсы высокой частоты (несколько десятков тысяч колебаний в секунду) продолжительностью в несколько тысячных долей секунды. Животные почти всегда прекрасно выдерживали экзамен, перепрыгивая на маленькую неподвижную платформу, чтобы отдохнуть от вращения. Разумеется, были приняты меры, исключающие всякую возможность ориентации по запаху. Быть может, систематические поиски откроют новые механизмы, подобные радарам, но и сейчас бионику есть над чем поразмыслить.

Интересны случаи прямого копирования; так, например, англичанин Л. Кэй создал миниатюрные акустические радары для слепых. Эхо отражается от предметов по-разному в зависимости от их удаленности от источника сигнала и формы поверхности; после небольшой тренировки с радаром Кэя можно отличать гладкие поверхности от поверхностей, имеющих какую-то фактуру. Этот портативный радар сконструирован на основе использования принципа действия природного радара подковоносов.

Да, природа создала изумительные модели радаров. Там, где радары применяются для военных целей,

противник часто старается поймать сигнал радара, чтобы узнать, не обнаружили ли его, и успеть принять контрмеры. Это один из эпизодов электронной войны. Противнику никак нельзя помешать уловить сигналы радара, и при этом, к сожалению, их можно уловить на очень большом расстоянии. Чтобы обнаружить самолет, сигнал радара должен обладать значительной мощностью, потому что ему предстоит преодолеть пространство между самолетом и радаром дважды (туда и обратно); при этом только малая часть сигнала, отраженного от самолета, будет распространяться в нужном направлении. Сигнал, попадающий в приемник самолета, оказывается гораздо сильнее, потому что проходит путь только в одну сторону. Конечно, приемник радарной установки чувствительнее приемника самолета: все характеристики посланного сигнала хорошо известны и приемник настроен так, чтобы избирательно принимать определенные сигналы, в то время как пилот самолета только приблизительно представляет себе характеристики этого сигнала. Но более высокая чувствительность приемного устройства радара не может компенсировать сильное ослабление эхо-сигнала по сравнению с излученным сигналом, так что в итоге преимущество все же остается на стороне самолета.

Пилот самолета обнаруживает радар задолго до того, как обнаружат его самого, у него есть время обдумать свои действия. Конечно, он мог бы изменить курс самолета, но не делает этого, так как летит с определенным заданием; если его обнаружил радар автоматической зенитной установки, он попытается сбить прицел серией резких и непредвиденных маневров. Можно применить и другую тактику: послать соответственно подобранные паразитные сигналы, которые нарушат работу радара и заглушат его. Сложная электронная система, направляющая прицел орудия, перестанет правильно действовать, и пилоту удастся вывести самолет из-под огня.

Уже давно многие насекомые, спасаясь от своих врагов — летучих мышей, используют весь этот арсенал приемов: прослушивание, маневрирование и активное глушение. Американский профессор К. Рёдер из университета Тафта детально изучил эти прие-

мы. Насекомое пользуется удивительно экономными средствами: его приемник ультразвука состоит всего из двух чувствительных клеток и двух связанных с ними нервных волокон. Волокна соединены с вибрирующей мембраной, которая соприкасается со слуховой полостью и напоминает миниатюрную барабанную перепонку. Вибрация этой перепонки вызывает механическое раздражение нервных волокон, и это раздражение преобразуется в импульсы нервных сигналов. Нервные волокна обладают неодинаковой чувствительностью. Одно — более чувствительное — позволяет насекомому узнавать о приближении летучей мыши на расстоянии порядка десятков метров; в этом случае насекомое старается как можно скорее удалиться от источника ультразвука. Если этот маневр не удался и мышь начинает настигать насекомое, в действие вступает второе волокно, предупреждая несекомое о приближении опасности. В этом случае наблюдатель видит, что насекомое пикирует на землю, если мышь летит сверху, или начинает серию беспорядочных бросков, если враг находится ниже, — резко, на большой скорости меняет направление. А так как у насекомого не один, а два приемника звука, расположенных по обеим сторонам грудки, оно может узнать, с какой стороны ему угрожает враг, учитывая разницу во времени получения сигнала каждым из этих примитивных «ушей». Опыты Р. Пейна из того же университета показали, что и крылья насекомого помогают ему определить относительное положение преследующей его летучей мыши. Когда крылья опущены, они определенным образом экранируют сигналы, идущие с некоторых направлений. Изменение интенсивности сигналов, поступивших в слуховые рецепторы, и несет информацию — «вверху» или «внизу».

Если же эти маневры не удались и летучая мышь приблизилась настолько, что стала повышать частоту испускаемых сигналов (верное указание, что она обнаружила свою жертву и готова ее схватить), насекомое (по крайней мере некоторые виды) пускает в ход свой глушитель. Особым образом двигая лапками, оно приводит в состояние вибрации крохотный кусочек своего хитинового покрова. Сигналы, излучаемые при этом, очень коротки и обладают частотой порядка тысячи

колебаний в секунду. Можно предположить, что этот глушитель нарушает работу системы локализации «выше — ниже» у летучей мыши. Дороти Даннинг показала эффективность этой системы. Она записала сигналы на пленку и включала ее в тот момент, когда летучая мышь приближалась к насекомому; почти всегда преследователь упускал свою жертву. Разумеется, бионику не обязательно копировать эти маневры живых существ. Но сказанное выше подтверждает одно общее правило: если система высокоспециализирована, против нее самой можно обратить именно эту высокую специализацию. Летучая мышь обладает весьма совершенным способом определять положение препятствия «выше — ниже» (по вертикали), а насекомое использует глушитель, полностью устраняющий эту информацию. Но тут возникает еще один вопрос: может быть, насекомое вовсе и не глушит радар летучей мыши, а этот шум просто означает: «За мной не стоит гнаться, я в пищу не гожусь»? И действительно, схватив одно из таких «шумных» насекомых, летучая мышь обычно его выбрасывает.

Системы локализации, которыми пользуются летучие мыши, дельфины, землеройки и другие животные, в своей основе вполне аналогичны системам радаров и сонаров, созданным человеком. Бионик может найти много интересного для себя, изучая типы сигналов; например, до сих пор ни в одном радаре не применялись сигналы, частота которых изменялась бы вдвое в пределах одного сигнала.

Интересны и те особенности, которые обеспечивают эффективность природного «глушителя» насекомых, — ведь от него значительно труднее избавиться, чем от обычных глушителей.

На совсем другие идеи могут натолкнуть радары иного типа, обнаруженные у так называемых «электрических» рыб. В этом случае слово «радар» не совсем подходит, потому что здесь нет измерения расстояний, но за неимением лучшего слова и эту систему можно называть природным радаром, тем более что она служит для обнаружения добычи. В настоящее время нет искусственных систем поиска, прямо копирующих этот живой радар, работающий по принципу генерации электрических разрядов. Возможно, это



Рис. 49. Скат обладает электрическим генератором. Нельзя ли использовать электрическое поле для обнаружения подводных лодок?

связано с тем, что его трудно воспроизвести, а может быть, и потому, что его особенности еще недостаточно изучены. Пожалуй, создание естественной модели оправдало бы затраченное на это время.

Некоторые рыбы обладают способностью генерировать электричество — это скаты, обитающие у берегов Франции и Америки, угри, живущие в реке Амазонке. Эти рыбы генерируют очень мощные разряды, достигающие нескольких киловатт; один такой разряд может парализовать крупное животное. Но бионика скорее заинтересуют те рыбы, сигналы которых слишком слабы, чтобы служить средством защиты. Такие рыбы обычно живут в мутных илистых водах и ведут ночной образ жизни. Как они находят свою добычу в условиях полного отсутствия видимости? Они ее «видят», или, точнее, обнаруживают, при помощи электрической системы, которая представляет собой радар особого типа.



Рис. 50. Электрический угорь генерирует электрические заряды напряжением более 400 вольт.

Знакомством с работой этого природного механизма мы обязаны в основном Г. Лиссманну из Кембриджского университета. При помощи электрических органов рыба создает вокруг своего тела электрическое поле. Это электричество — нервного происхождения. Оно порождается тем самым перемещением ионов, которое связано с возникновением нервного импульса в нервных волокнах. Тут имеются только количественные различия: энергия нервных импульсов очень незначительна, а энергию, нужную для создания электрического поля вокруг тела рыбы, никак не назовешь «незначительной». Конфигурация поля проявляется в виде так называемых силовых линий. Если под лист бумаги с насыпанными на него железными опилками поместить магнит, опилки расположатся по определенным линиям; это и есть силовые линии магнитного поля. На рис. 51 показаны силовые линии, но уже электрического поля, которые образуются вокруг тела электрической рыбы, например электрического угря. Удивляет сходство этого поля с магнитным. Как же рыба использует свое электрическое поле? На голове у нее имеется целый ряд специальных чувствительных органов, способных улавливать изменения электрического поля, когда к животному приближается объект, состоящий из не проводящего ток материала (*1* на рис. 51, *б*) или из проводника (*2* на рис. 51, *б*). Нетрудно заметить, что деформации поля зависят от того, что́ приближается к рыбе — проводник (силовые линии как бы стягиваются) или изолятор (силовые линии «отталкиваются»). Рыба определяет изменения конфигурации поля, возникающие в результате деформаций, и это позволяет ей находить и узнавать свою добычу.

Поле, которое генерирует электрический угорь, имеет переменный характер и возникает только в виде импульсов. Но эти импульсы не похожи на сигналы радара, так как в этом случае определяется не эхо-сигнал, а характер деформации электрического поля. Электрические рыбы обладают высокой чувствительностью. Они реагируют на очень малые предметы и при этом улавливают ничтожные различия в электропроводности предметов одинакового размера. В чем секрет такой точности? Причиной столь малой высоты

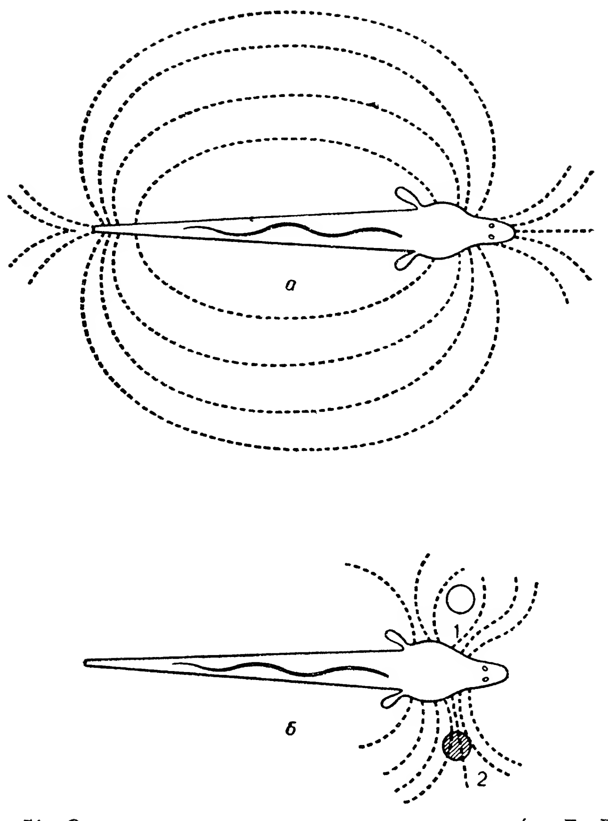


Рис. 51. Электролокация у электрического угря (по Г. Лиссману).

а — нормальное электрическое поле вокруг тела рыбы: *б* — поле, деформированное посторонним предметом.
1 — изолятор, *2* — проводник.

порога возбудимости, в частности, является пульсирующий характер поля. Клетки чувствительного органа-детектора воспринимают не само электрическое поле, а его изменения, и в основе этого восприятия лежит весьма остроумный механизм. Чувствительный орган сам генерирует биоэлектрические колебания, частота которых в несколько раз больше частоты пульсаций электрического поля рыбы. Нервные импульсы от этого органа так совпадают с частотой пульсации поля, что каждый импульс возникает в

промежутке между вспышками импульсов поля. Таким образом, интервал между нервными импульсами, возбужденными магнитным полем, измеряется внутренним ритмом органа-детектора. Длительность задержки от момента генерации импульса электрического поля до момента, когда орган-детектор посылает свой нервный импульс, дает количественную характеристику поля, измеряемого детектором. У живых существ есть орган, прекрасно анализирующий промежутки между нервными импульсами, — мозжечок. К нему и поступают нервные импульсы от органа-детектора и органа, генерирующего электрическое поле. У электрических рыб он хорошо развит. Если бы электрическое поле, генерируемое рыбой, носило постоянный характер, процесс измерения был бы невозможен. Пульсирующий характер поля — его самая главная особенность.

Интерес биоников к такому приспособлению легко понять. Вопрос первостепенного значения — защита от подводных лодок, их обнаружение по деформациям искусственно созданного электрического поля. А электрические рыбы могут стать прекрасной естественной моделью такого прибора.

ГЛАВА 9
ОБУЧЕНИЕ, САМООБУЧЕНИЕ, САМООРГАНИЗАЦИЯ

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В ЖИВЫХ СИСТЕМАХ

Мы уже ознакомились с несколькими бионическими темами, и все они так или иначе касались вопроса получения информации живыми системами. Настало время двинуться дальше и разобраться в том, как живая система определяет свое поведение на основе этих данных, как она действует. Несомненно, многие действия являются результатом чисто автоматических процессов: если ударить по коленной чашечке, нога подскакивает как бы сама собой, помимо нашей воли. Поведение низкоорганизованных существ не выходит за пределы таких автоматических реакций, или рефлексов. Но по мере того как мы поднимаемся вверх по древу жизни, встречаются существа, поведение которых уже не так примитивно, и реагируют они не только автоматически — они способны принимать решения. Как же принимаются сознательные решения? Ответ на этот вопрос очень важен, тем более что именно сейчас идут напряженные поиски конструкций искусственных автоматических систем, которые могли бы облегчить человеку принятие решений, особенно в тех случаях, когда ситуация настолько сложна, что человек не может оценить ее с первого взгляда. Как сконструировать такую искусственную систему и каким образом использовать ее для получения нужных результатов?

Чтобы ответить на эти вопросы, постараемся разобраться в том, как человек принимает решения. Для того чтобы принять решение, нужно располагать всеми необходимыми сведениями. Разумеется, в первую очередь нужно произвести анализ окружающей среды. На техническом жаргоне это называется распознаванием образов. Слово «образы» здесь используется в самом общем смысле и охватывает все признаки, характерные для данной ситуации, признаки, определяющие эту ситуацию. Совершенно новых ситуаций мы

почти не встречаем: каждая из них в той или иной степени напоминает одну из ситуаций, знакомых нам по прошлому опыту. Чтобы извлечь максимальную пользу из этого опыта, нужно оценить и классифицировать новую ситуацию, сравнивая ее со знакомыми ситуациями, короче говоря, «опознать» ее. Каждая ситуация предстает перед живым существом в виде целого комплекса чувственных раздражений, стимулов. Эти стимулы подвергаются анализу в нервной системе и становятся объектом идеализации, или абстрактной схематизации «в уме». Схема, то есть абстрактный образ действительной ситуации, сравнивается с другими абстрактными схемами, которые постоянно хранятся в памяти. Очень редко попадается ситуация настолько новая, что ее невозможно сравнить ни с одной из прошлых ситуаций. Как только закончена фаза узнавания, начинается вторая фаза, фаза собственно выбора: зная решение, принятое в прошлый раз в аналогичной ситуации, и учитывая результат этого выбора, можно принять решение, наиболее подходящее для данного случая. Вторая фаза сводится к применению критериев выбора, а они варьируют в зависимости от того, готов ли принимающий решение пойти на риск или боится проигрыша, а может быть, предпочитает как можно полнее использовать возможные преимущества.

Критерии выбора всегда остаются личным делом каждого, именно в этом и проявляется свобода выбора. Но машина может принести немало пользы, автоматически опознавая ситуации. Напрашивается сравнение описанного выше логического анализа с физиологическими процессами, протекающими в организме; поэтому и начались поиски специализированных и четко локализованных участков, где происходит анализ ситуаций, хранение их в памяти и принятие решений. Но это ложный путь, который может завести в тупик. Бионик всегда стремится не к рабскому копированию отдельных участков нервной системы, а к пониманию функций системы в целом, которое помогло бы ему лучше организовать работу машин и механизмов.

Самое поверхностное наблюдение позволяет утверждать, что большинство схем, хранящихся в памяти,

являются не врожденными, а приобретенными. Поэтому биоников очень интересуют проблемы обучения. Но не следует думать, что автоматическое распознавание образов обязательно связано с обучением. Можно сконструировать машины, способные опознавать ситуации, и при этом не потребуется прибегать к обучению. Например, можно создать машину, различающую буквы алфавита независимо от того, напечатаны они или написаны, прямые они или наклонные. В результате детального анализа геометрической формы каждой буквы, пренебрегая ее случайными признаками, можно выделить для каждой буквы присущие только ей признаки, отбрасывая все индивидуальные отклонения (величина и высота букв, особенности почерка). Отсюда выводятся строгие правила идентификации, на основе которых составляется программа электронной вычислительной машины. После этого любая представленная машине буква будет рассмотрена в соответствии с этими правилами и опознана как *А* или *Е* или еще какая-нибудь буква алфавита. Это достаточно эффективный метод, и ему посвящено много научных работ, но он далек от бионики. Ведь человеческое существо действует и поступает совсем иначе.

ОБУЧЕНИЕ

Как же человек узнает буквы алфавита? Еще в школе детям показали буквы определенной формы. Затем эта форма стала варьировать, ребенок научился обобщать, стал понимать, что *А*, а и *a* — это одна и та же буква. Мало-помалу ученик начинает читать рукописный текст, не обращая внимания на правильность или красоту почерка. При этом ему случается ошибаться, но учитель каждый раз его поправляет, указывает на ошибку и подсказывает верный ответ. Возможность ошибки возникает потому, что в случае полной или частичной неосведомленности ответ дается более или менее наудачу. Обучение устраняет неосведомленность, сообщая определенную информацию. Итак, мы встретили новые понятия: «неосведомленность» и «обучение»; их противопоставление аналогично уже знакомому нам противопоставлению случайности и информации. Обучение и случайность

связаны тесной зависимостью, и если предположить, что разум — результат обучения, то никакая машина, действия которой раз и навсегда определены, не заслуживает названия разумной.

Значит, можно построить машину для распознавания букв, функции которой будут заранее четко определены. А что, если создать машину, которую можно было бы обучать? Предположим, что это осуществимо (а как мы увидим далее, это вполне осуществимо), и сравним эти машины. Работают они как будто одинаково, и не исключено, что детерминированная машина никогда не будет ошибаться, а обучаемая будет время от времени допускать ошибки. Тогда зачем создавать обучающиеся машины? Представим себе, что нужно быстро сменить задание, выполняемое машиной, например использовать ее для распознавания цифр вместо букв. Разумеется, обе машины совершенно неспособны сразу же приноровиться к внезапной смене задания. Но если детерминированная машина никогда не сможет к этому приспособиться, то с обучаемой машиной дело обстоит иначе. Ей сообщают ошибки, и она вносит поправки в свою программу; короче говоря, ее заново учат узнавать цифры, так же как учили узнавать буквы. Поведение второй машины качественно отличается от поведения первой, и это отличие — способность адаптироваться. А умение приспосабливаться к изменениям внешней среды — существенно важная особенность; в процессе эволюции живого мира выживали именно те существа, которые приспосабливались лучше других.

Любую систему, способную обучаться, можно представить в виде схемы, показанной на рис. 52. Структура переработки информации вполне соответствует классической: входной блок (*1*), орган обработки информации (*2*) и выходной блок (*5*). Но функции органов обработки информации внутри системы не определены раз и навсегда с самого начала. Имеется второй путь, параллельный первому и связанный с ним; этот путь включает в себя блок оценки (*3*), который одновременно получает информацию о присутствии на входе системы определенной ситуации (*А*) и о принятом решении (*Г*). Распознавание ситуации и принятие решения происходят в обычном порядке —

по первому пути. Блок оценки сравнивает причину и следствие, *А* и *Г*, и, согласно некоторым критериям оценки (*4*), признает решение удачным или неудачным. В первом случае орган обработки информации получает «поощрение», а во втором — «наказание». Прежде чем объяснить, как можно поощрять или наказывать машину (это звучит довольно странно), заметим, что схема точно отображает отношения между

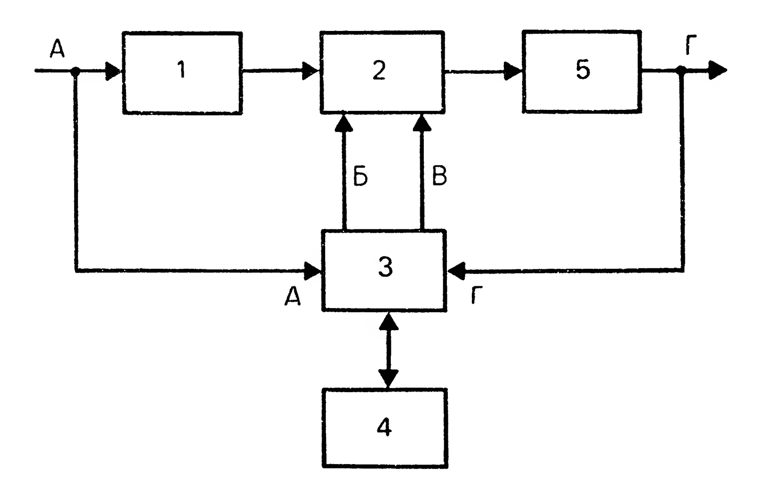


Рис. 52. Схема системы, способной к обучению.

1 — входной блок; *2* — обучающийся орган обработки информации; *3* — блок оценки; *4* — блок критериев оценки; *5* — выходной блок.
А — ситуация на входе; *Б* — поощрение; *В* — наказание; *Г* — решение на выходе.

учеником и учителем. Прямая цепь (*1*, *2*, *5*) представляет собой поведение ученика; параллельная цепь (*3*, *4*) — поведение учителя. Учитель заранее знает верный ответ на поставленный вопрос, и сравнение с ответом ученика (*Г*) происходит мгновенно. На схеме «учитель — ученик» критерии оценки (*4*) — это правила, заранее известные учителю. В других случаях действуют эмпирические критерии правильности ответа: стоит ребенку раз обжечься, и он больше не полезет к огню. Обучение в самом общем смысле слова, как это показано на рис. 52, может называться иначе: самообучение (особенно в случае самообразо-

вания) или выработка условных рефлексов (главным образом в том случае, когда речь идет о животных). Во всех подобных случаях система, способная к обучению, — это система, способная к самоорганизации путем изменения внутренней функции переработки информации (*2*).

Не следует путать обучение со способностью к распознаванию образов, а также с самоорганизацией. Система, способная к обучению, непременно должна обладать способностью к самоорганизации; но некоторые системы могут путем самоорганизации приспособиться к данной ситуации, и все же это никак не связано с обучением. Например, искусственная система может дать правильный ответ, если заранее известно несколько возможных ситуаций на входе. Для наилучшего выбора решения в каждой ситуации требуется определенный путь преобразования информации. Остается вложить в память машины все возможные пути преобразования и придать машине способность опознавать предлагаемые ситуации, относить их к определенной категории, или классифицировать. Определив категорию, машина находит соответствующее решение в своей памяти. Значит, машина каждый раз прибегает к самоорганизации, чтобы лучше приспособиться к данной ситуации. Схема системы такого рода почти такая же, как на рис. 52. Отсутствует только важнейшее звено: обратная связь, которая сообщает блоку оценки (*3*) решение, появившееся на выходе (*Г*). А как раз обратная связь — решающее звено в процессе обучения. Способность к самоорганизации, к изменению своей передаточной функции — еще недостаточное условие для того, чтобы назвать систему обучающейся: необходимо, чтобы эти изменения были связаны прямой зависимостью с полученным результатом и чтобы этот вариант получал подкрепление в случае удачного решения и штрафовался бы в случае неудачи. Если мы имеем дело с живым существом, подкрепление и штраф связаны с поощрением или наказанием. Теперь вам ясно, как можно обучать машину: вместо того чтобы ее поощрять или наказывать, что было бы поистине удивительно, нужно просто соответствующим образом модифицировать ее передаточную функцию.

Самоорганизующаяся система, способная к обучению, должна постоянно функционировать наилучшим образом: с каждым изменением внешней среды машина тут же меняет свое поведение, чтобы как можно лучше приспособиться к новым условиям. Конечно, среди систем этого типа тоже существует иерархия. Сложность их строения и функций неодинакова. Наиболее сложные системы — живые существа, и человек — непревзойденная модель подобной системы. Но есть и другие примеры. Промышленное предприятие — это тоже самоорганизующаяся система, которая должна действовать, извлекая максимальную пользу из прошлого опыта для принятия решений в будущем, и, следовательно, должна быть способна к обучению. Любое человеческое сообщество тоже представляет собой самоорганизующуюся систему, которая обучается в ходе исторического процесса. Плоды этого обучения распределяются отчасти бессознательно, отчасти сознательно между личностями, составляющими общество. Поведение общества представляет собой результат взаимодействия поведения отдельных его ячеек. Теорией и практикой доказано, что если информация, полученная при обучении, остается рассеянной, а поведение отдельных личностей плохо скоординировано, то вся система действует далеко не лучшим образом. Гораздо удобнее было бы организовать функции такой системы подобно функциям человеческого организма: отобранная информация со входа передается по низшим ступеням к центральному органу, который принимает решение, выгодное для всего коллектива в целом. Это решение от центра «спускается» к исполнительным органам, полностью приспособленным к местным условиям. Потому-то так продуктивны хорошо составленные планы. Отсюда легко объяснить огромный интерес к электронным машинам во всех странах: это не мода и не предмет роскоши, а предмет первой необходимости во всяком обществе, которое стремится функционировать как можно лучше. Мы видим новое подтверждение (хотя едва ли в этом есть необходимость) несомненной пользы бионического подхода к проблемам обучения.

Несколько выше мы заметили, что системы, способные к обучению, неодинаково сложны и совершен-

ны. Возникает проблема численного выражения качественной стороны обучения. При этом необходимо совершенно точно определить индекс, который позволил бы оценить успех последовательных попыток в процессе обучения. За такой индекс можно принять время, которое понадобилось на рассмотрение возможностей и на выбор правильного ответа. Если выбор бинарный (правильный или неправильный, без

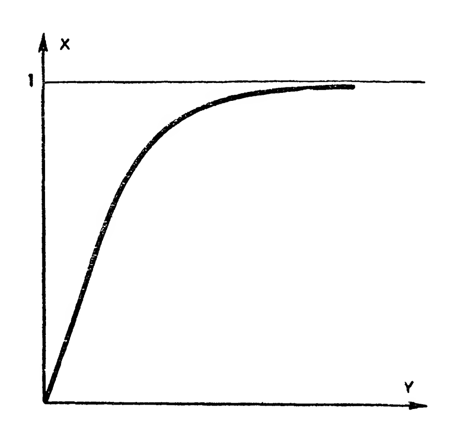


Рис. 53. Типичный график процесса обучения.
X — среднее число удачных попыток; *Y* — шкала времени.

всяких оттенков), то проще всего принять за индекс отношение числа правильных решений к общему числу попыток. На рис. 53 показана типичная кривая, отражающая результаты таких опытов. Вид этой кривой хорошо знаком зоопсихологам, которые занимаются обучением животных. Не следует думать, что к обучению способны только высшие животные. Нет такого животного, которое нельзя было бы чему-то научить. Поощрение обычно дается в виде пищи, для наказания используют иногда удар электрического тока. Но не мешает вспомнить еще раз, что поощрение и наказание — только посредники; сущность процесса обучения — в организованном изменении поведения, в машинах же обучение действует непосредственно на их передаточную функцию.

ОБУЧАЮЩАЯСЯ МАШИНА: ПЕРСЕПТРОН

Одна из первых, а может быть, и самая первая машина, способная обучаться, описана в 1913 году Г. Расселом; это была гидравлическая модель, потому что электроника в те времена находилась еще в колыбели. Только в 1950 году известный английский психиатр и физиолог Грей Уолтер снова вернулся к этой проблеме и сконструировал первых «кибернетических животных». Примерно в то же время К. Шеннон сделал «электронную мышь», которая быстро ориентировалась в лабиринте, предварительно «ознакомившись» с ним. Эти интересные работы положили начало целому каскаду исследований. Перечислить их невозможно. Ограничимся одной иллюстрацией — опишем вкратце принцип устройства обучающихся машин, над которыми в США с 1957 года работала группа ученых Корнеллской аэронавигационной лаборатории под руководством Ф. Розенблатта. Эти машины получили название персептронов *.

О персептронах много спорили. Несомненно, эти машины далеки от совершенства, которое им хотели приписать некоторые ученые, но с их помощью значительно проясняется проблема распознавания образов. Что же такое персептрон? Эта машина состоит, как правило, из четырех частей (рис. 54). Первая часть — чувствительная сетка, представляющая собой мозаику из отдельных ячеек ($Ч_1$, $Ч_2$ и т. д.). На рисунке показано всего 16 таких ячеек, в действительности же их насчитываются сотни и тысячи, если не больше. Иногда это, например, фотоэлементы, воспринимающие освещенные изображения. Вторая часть — серия элементов, называемых ассоциативными клетками (A_1, A_2 ... A_n); их также сотни или тысячи. Дальше идет орган принятия решений (P); он способен принимать только некоторое количество определенных решений. И последняя часть — блок оценки (O), сравнивающая принятое персептроном решение с тем, которое следовало принять, исходя из характеристик образа, поданного на вход машины. Результат сравнения позволяет узнать правильность решения; данные поступают в

* От английского слова «perception» — восприятие.

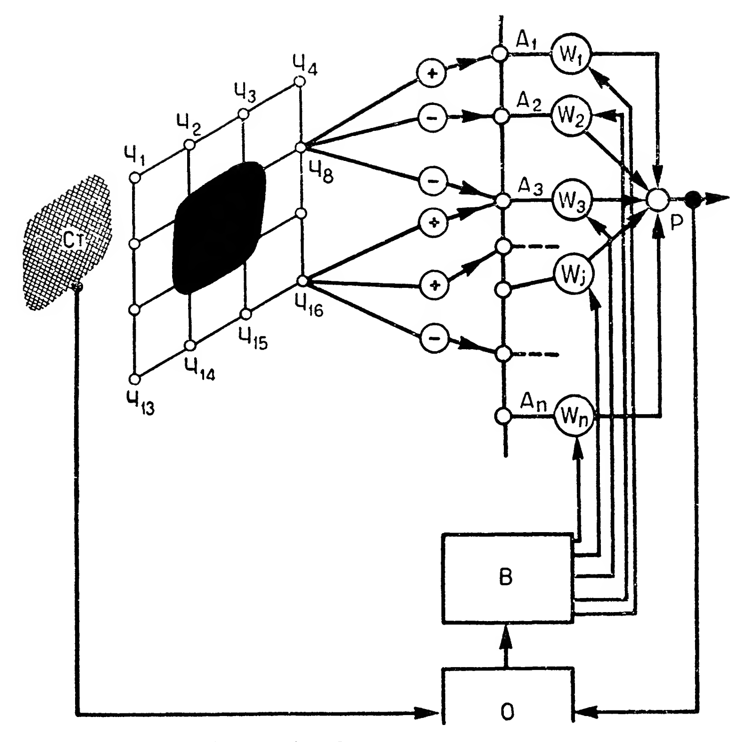


Рис. 54. Схема персептрона.

$Ч_1 - Ч_{16}$ — чувствительные клетки (ячейки) на входе; $A_1 - A_n$ — ассоциативные ячейки; P — орган, принимающий решение; O — блок оценки; B — вычислительное устройство, вносящее поправки в передаточную функцию; $W_1 - W_n$ — коэффициенты, которые подвергаются изменениям в процессе обучения; $Ст$ — стимул на входе.

вычислительное устройство (B), которое определяет, в какую сторону изменить передаточную функцию машины. Если принятое решение правильно, происходит усиление этой функции, если нет — ослабление.

К персептрону подходили с точки зрения кибернетики. Машину рассматривали как модель, имитирующую нервные механизмы распознавания образов у живых существ: сеть чувствительных клеток на входе уподобляли сетчатке глаза, серию ассоциативных элементов — нервным ганглиям, а орган принятия решения — участку коры головного мозга. Основная проблема — это проблема взаимосвязи различных частей

машины. Нервная система человека невероятно сложна, ее нужно бесконечно упростить, чтобы сконструировать модель. Ф. Розенблатт взял за основу следующие соображения: на первых стадиях развития живого существа нервные волокна, по-видимому, распределяются более или менее случайно. Значит, можно допустить, что чувствительные клетки (*Ч*) связаны с ассоциативными (*А*) совершенно беспорядочно и случайно. Точнее, отдельная чувствительная клетка, например $Ч_8$, должна быть связана с множеством клеток *А*, в предельном случае со всеми — от $А_1$ до $А_n$. Только одни связи будут проводить возбуждение, а другие — тормозить импульсы, подобно синапсам нервной сети. В чем смысл этого предположения? Чувствительные клетки реагируют по принципу «все или ничего», +1 или 0, в зависимости от того, возбуждены они или нет (это новое и очень удобное упрощение). Проводник возбуждения пропускает сигнал +1 без изменений, а тормозящее волокно преобразует сигнал +1 в —1. Как тормозящие, так и проводящие связи возникли случайно; поэтому должно встречаться примерно одинаковое количество тех и других.

Когда на сеть чувствительных клеток подается какой-то стимул (*Ст*), например светящаяся геометрическая фигура, и если сеть состоит из фотоэлементов, некоторые чувствительные клетки приходят в возбуждение и посылают сигнал +1. Так как в реакции участвуют многочисленные проводящие и тормозящие волокна, ассоциативные клетки получают огромное количество сигналов +1 от проводящих волокон и сигналов —1 от тормозящих. Каждая клетка *А* способна алгебраически суммировать полученные положительные и отрицательные сигналы. Другими словами, она находит алгебраическую сумму сигналов +1 и сигналов —1, поступающих на вход. Если полученная сумма больше числа, фиксированного априори, клетка дает на выходе сигнал +1, если меньше — сигнал не возникает. Таким образом, эта клетка играет роль искусственного нейрона. Тот же процесс повторяется в органе принятия решения, с той только разницей, что здесь связи играют более активную роль, глубже преобразуя передаваемые сигналы. Каждую такую связь можно представить схематически в виде

положительного коэффициента W. Если на входе получен сигнал, равный $+1$, то на выходе такой линии связи возникает сигнал, в W раз больший. Так, образ с входов чувствительных клеток передается при помощи определенной комбинации сигналов W на вход органа, принимающего решение. Комбинаций, или результатов на выходе, столько же, сколько категорий или классов анализируемых образов. Машина производит сравнение численных величин полученных результатов. Один из них оказывается больше остальных. Номер соответствующего выхода говорит о категории, к которой относится образ, показанный машине в данный момент.

Величина коэффициентов W не фиксируется раз навсегда, она может меняться, а это и делает машину способной к обучению. Чтобы поощрить или наказать персептрон, требуется определенное воздействие на коэффициент W. Машину обучают и тренируют до тех пор, пока она не научится правильно распознавать образы. Для этого ей предлагается первый образ ($Ст$). Так как распределение связей между чувствительными и ассоциативными клетками и исходные значения коэффициентов совершенно произвольны, первый выбор всецело зависит от случая. Вполне возможно, что он окажется правильным; значит, нужно поддержать факторы, которые привели к правильному выбору, то есть увеличить коэффициенты там, где они имели положительное влияние, и уменьшить их значение там, где они не содействовали принятию этого решения. Если принятое решение было неверным, поступают наоборот. Например, чтобы научить персептрон различать круг и квадрат, нужно сначала поместить перед сетью чувствительных клеток квадрат и в зависимости от полученного ответа исправить коэффициенты, которые обеспечивают обучение. Затем те же действия повторяют с кругом. Для следующей операции берут квадрат, отличающийся от первого: он может быть больше или меньше первого либо иначе ориентирован. Затем снова возвращаются к кругу и повторяют это до тех пор, пока машина не начнет действовать практически безошибочно — доказательство того, что она правильно обучена. Следует заметить, что обучаемая машина (персептрон или машина

другого типа) способна к некоторым обобщениям, к созданию абстрактных понятий; она относит к категории кругов и те круги, которые ей не встречались в процессе обучения. Машина напоминает ученика, который узнает букву «а», каким бы почерком она ни была написана, даже если она совсем непохожа на прописи, выученные в школе.

Персептрон не предназначают для одной-единственной операции распознавания. Его можно научить различать две разные буквы, затем — две цифры, а потом снова вернуться к буквам, и так далее. Но при очередной смене объекта-раздражителя машина должна «забыть» все, чему ее научили раньше, чтобы научиться различать новые образы. Так что при каждой перемене задания все ранее приобретенное теряется. Естественно возникает вопрос: не происходит ли что-либо подобное и в живом организме? Если нет, то перед бониками откроются новые возможности постройки машин, автоматически распознающих образы.

Что касается способности животных учиться простому действию, то зоопсихологи давно заметили одну интересную закономерность: кривая на графике, показывающая рост количества удачных попыток в опытах (обычно это процентное отношение числа удачных решений к общему числу попыток), имеет одну и ту же характерную форму независимо от положения животного на эволюционной лестнице. В первой половине XX века было сделано несколько поспешное заключение, что интеллект у всех животных в принципе одинаковый, а это привело к естественному выводу: совершенно ни к чему использовать в опытах разных животных.

Нужно выбрать наиболее удобные для лабораторных исследований виды животных, например крыс. Но ограничивая себя таким образом, ученые заранее отказывались обсуждать возможность существования градаций в интеллекте животных. Если поразмыслить, то простейшие опыты по обучению доказывают только одно: трудности при установлении связей в нервной системе примерно одинаковы для всех видов. Но если предположить, что в области интеллекта животных существуют различия, то эти различия должны

проявляться все более наглядно по мере усложнения экспериментов.

С некоторых пор зоопсихологи перешли именно к сложным экспериментам. Типичный пример подобного опыта — обучение с последующей сменой значения раздражителей. Например, в аквариум к осьминогу помещают небольшого краба (для осьминога это — большое лакомство). Одновременно осьминогу показывают белый квадрат — условие, при котором осьминог не должен трогать краба. Если он все-таки попробует схватить добычу, его наказывают ударом тока. Еще один опыт: рыбке показывают два круга, красный и зеленый. Какой из них осветится, решает случай, но рыбка должна подплывать именно к этому кругу. Если она выбрала правильно, то получает в награду червяка; если выбор ошибочный — ничего не получает. Экспериментатор может выбирать круги, освещающиеся в каждом опыте, совершенно произвольно. А когда животное выработало привычку, условия эксперимента меняют на обратные: то, что нужно было делать, запрещается, а то, что запрещалось, теперь считается правильным. Поначалу животное совершенно дезориентировано, оно продолжает вести себя так же, как до смены условий, но постепенно переучивается и делает то, что требует экспериментатор. Но как только это произойдет, экспериментатор снова меняет условия опыта, возвращаясь к первой ситуации. И так несколько раз. Именно в этих опытах проявляется существенное отличие одних животных от других в зависимости от их положения на эволюционной лестнице. Такое примитивное существо, как рыба, не улавливает связи между последовательными переменами условий опыта. При каждой смене ей требуется одинаковое время, чтобы привыкнуть к новым условиям. Напротив, высокоразвитое животное, крыса например, быстро приспосабливается к переменам: при смене значений раздражителей ей нужно с каждым разом все меньше времени, чтобы научиться делать правильный выбор. В этих опытах совершенно определенно проявляются качественные различия в интеллекте животных.

Опыты с крысами ясно показывают, что здесь уже нельзя говорить о простой перестройке рефлексов,

которая позволяет перейти от распознавания одной ситуации к распознаванию другой путем постепенного разрушения ранее установленных связей и образования новых. Надо признать, что анализ, производимый животным для принятия решения, гораздо более глубок и включает в себя по крайней мере два процесса: распознавание образов и опознавание или анализ ситуации. Низшие животные могут только вырабатывать условные рефлексы, всегда одинаково связывая между собой чувственные раздражители (красный или зеленый свет) и результат (получение пищи или ее отсутствие). Более высокоорганизованное животное способно отличать распознавание образов, узнавание чувственных раздражителей от результата сделанного выбора. Когда условия опыта меняются на обратные, распознавание образов не приходится подвергать пересмотру, изменяется только анализ ситуации. Двигаясь в этом направлении, мы поднимаемся до уровня обучения, доступного мозгу человека. Здесь мы встречаем сложнейшие функции, требующие действия целой иерархической системы распознавания. Именно сочетанием иерархических уровней объясняется непостижимая сложность человеческого поведения. Это открытие должно вдохновить бионика на еще более настойчивое исследование интереснейших возможностей, которые открываются перед обучающимися машинами. Можно только догадываться, насколько богаты будут эти возможности, если в состав машины конструкторы включат не один обучающийся элемент, а целую серию органов, расположенных в иерархическом порядке по образу и подобию природного прототипа!

Из всего сказанного видно, что процесс обучения гораздо сложнее, чем процесс выработки простого условного рефлекса. Это очень сложное явление*.

Современный персептрон (так же как и остальные обучающиеся машины) находится еще на уровне условного рефлекса, на уровне рыбы, обладающей про-

* Чтобы у читателя не сложилось впечатление, что автор противопоставляет процесс обучения и процесс выработки условного рефлекса, необходимо подчеркнуть, что любой, даже самый сложный процесс обучения животного и человека основан на выработке сложной системы условных рефлексов.

стой условнорефлекторной деятельностью *. Предстоит много работы, прежде чем мы получим машины, способные к более тонкому обучению подобно крысе, а может быть, в конечном итоге и человеку.

---

* Способность рыб к различению зрительных образов неизмеримо выше, чем у персептрона, и такое сопоставление вряд ли правомерно.

ГЛАВА 10
ВИДЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

ПАМЯТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Человек непрерывно в течение всей своей жизни принимает решения. При этом прежде всего, как мы только что говорили, происходит распознавание образов, характеризующих окружающую среду, затем классификация этих образов путем сравнения их с теми, которые известны из прошлого опыта. В случае простого условного рефлекса решение принимается автоматически. Если же речь идет о более развитом интеллекте, то сначала происходит распознавание образов, а затем — анализ последствий возможного выбора. Все эти стадии тесно связаны с тем, что мы называем памятью. В процессе распознавания образов и последующего анализа существует определенная иерархия, которая требует более обширной памяти, но роль памяти в принципе остается прежней. Таким образом, память абсолютно необходима не только человеку, но и любому живому существу. Универсальные способности к обучению тесно связаны с универсальностью памяти.

В течение многих веков память была предметом размышлений философов. Машины, наделенные памятью, появились уже давно; еще в XVIII веке автоматы и музыкальные шкатулки обладали каким-то подобием памяти. Но эта «память» была так убога, что никому и в голову не приходило сравнивать ее с памятью человека. С появлением электронных машин все изменилось. У этих машин действительно есть способность запоминать. Память машины хранит порядок операций, которые нужно произвести, многочисленные исходные данные предложенной задачи и все промежуточные результаты. Так проблема памяти сразу спустилась с метафизических высот в область конкретной реальности. Искусственная память развивается и очень быстро совершенствуется. Быть может, в этой области можно воспользоваться нашими до-

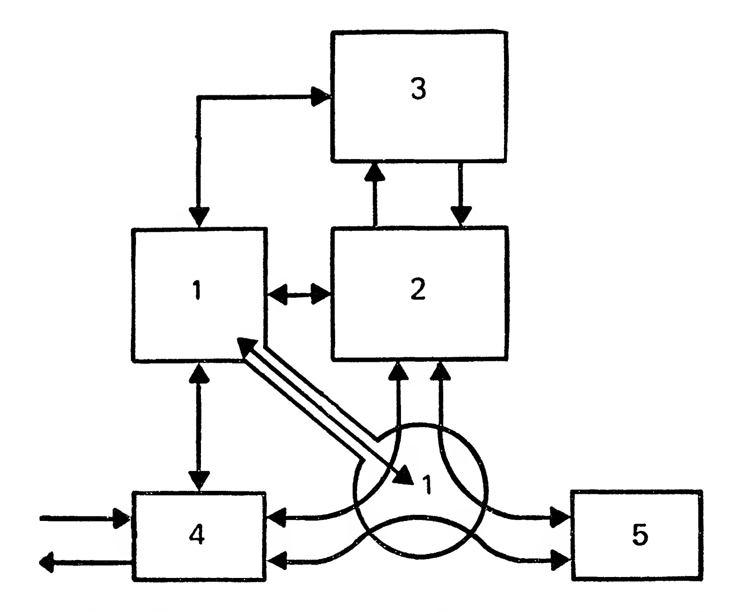


Рис. 55. Принципиальная схема электронной вычислительной машины.

1 — общее управление; *2* — оперативная память; *3* — процессор; *4* — входы — выходы; *5* — долговременная память.

стижениями в изучении человеческой памяти, и тогда бионику предстоит сыграть в этом деле не последнюю роль. Но чтобы ясно очертить проблему, нужно прежде всего вспомнить, как устроена электронная вычислительная машина и какую роль в ее работе играет память.

Если пренебречь особенностями отдельных моделей, окажется, что эти машины удивительно похожи друг на друга. Схема, изображенная на рис. 55, может быть отнесена к любой электронной вычислительной машине независимо от того, кто ее конструировал и каково ее назначение. Как показано на схеме, такая машина состоит из четырех частей: процессора, блоков памяти, управления, органов на входе и на выходе. Процессор (*3*) производит арифметические действия — сложение и вычитание, но это нисколько не ограничивает возможности машины, потому что умножение можно заменить серией сложений, а

деление — серией вычитаний. Оперативная память (*2*) служит для хранения информации, необходимой при расчетах: исходные данные, последовательность операций (так называемая программа), промежуточные и конечные результаты. Комбинированный ансамбль вход — выход (*4*) обеспечивает связь машины с внешним миром: она получает данные для расчетов на входе и выдает результаты на выходе. Кроме кратковременной, оперативной памяти имеется еще память, хранящая информацию (*5*), которая приходит на помощь оперативной памяти. Блок общего управления (*1*) управляет всей системой, обеспечивая оптимальный режим ее работы; в каждый данный момент он осуществляет необходимую связь между остальными частями машины. Например, связывает блок долговременной памяти с органами на входе, когда туда поступает информация, а блок оперативной памяти — со счетными устройствами в то время, когда производятся расчеты. В самых совершенных машинах блок управления может одновременно устанавливать многочисленные связи, обеспечивая наиболее полное использование возможностей машины. Например, чтобы не терять времени, пока информация циркулирует между входом и долговременной памятью, в процессорах и блоках кратковременной памяти уже производятся отдельные расчеты.

Память счетной машины может функционировать по-разному. Есть постоянная, или мертвая, память; информация записана в ней раз и навсегда, ее нельзя уничтожить или изменить. Самый простой и давно известный пример этого типа памяти — перфокарта: данные или указания программы переводятся в соответственно расположенные отверстия на бумажной карте. Органы на входе считывают эту информацию, и она легко усваивается машиной. Другой вид памяти — оперативная память; она имеет динамическую природу и действует с фантастической скоростью: информация в ней записывается и стирается за миллионные доли секунды. Но емкость ее сравнительно мала (это определяется экономией средств), и поэтому она связана с долговременной памятью, которая хранится в виде записей на магнитной ленте. Емкость долговременной памяти может быть громадной.

Современные машины способны хранить информацию. которую человек получает за всю свою жизнь.

Основная проблема памяти заключается в том, чтобы как можно быстрее отыскать записанную в ней информацию. В вычислительных машинах это осуществляется при помощи так называемого адреса. Память можно сравнить с громадной картотекой, состоящей из огромного числа ячеек. Чтобы легче найти то, что помещается в одной из этих ячеек, нужно обозначить ее номером и дать ей адрес. Процесс сложения, например, выполняется в заданном порядке (вспомним, что этот порядок — элемент программы машины): отыскивается число, находящееся в ячейке памяти под номером 12 120, к нему прибавляется число под номером 3144 и результат записывается в ячейку 23 159. Впоследствии, если для дальнейших вычислений необходим этот промежуточный результат, машина (то есть программа) вспомнит, что результат находится именно в ячейке 23 159. Это надежный метод, но он требует точных сведений о том, в какой ячейке находится нужная информация. А то может случиться так, что информация есть, а где она — неизвестно. Что же делать в таком случае?

Заметьте, что это не надуманная ситуация. И вот простой пример — механизация розыска документов. Документы — книги или журналы, поступающие на хранение, — анализируются, переписываются на язык, понятный машине, то есть кодируются на ее языке, или, скорее, перекодируются с нашего обычного языка на язык машины, а затем регистрируются в ее памяти. Каждый документ снабжается специальными обозначениями, его краткое содержание выражают несколькими так называемыми «ключевыми словами». Число документов, помеченных определенным набором ключевых слов, заранее не известно. Чтобы разыскать все документы, имеющие отношение к данной теме, ее содержание также выражают набором ключевых слов, взятых из словаря, уже использованного при составлении характеристик документов. Затем этот набор слов сравнивается со всеми наборами, характеризующими отдельные документы. Если в наборе слов определенного документа обнаруживаются все ключевые слова заданной темы, выбирают этот документ, так

как именно он должен относиться к нашей теме. Таким образом, приходится перебирать все документы, хранящиеся в памяти машины, потому что никто не имеет понятия о том, где же фактически находятся нужные документы. Это очень трудоемкий метод розыска. Тем не менее благодаря сверхвысоким скоростям работы электронных машин операция занимает немного времени, но от этого суть дела не меняется: чтобы получить ответ всего на один вопрос, приходится просматривать все документы, хранящиеся в памяти машины.

ЧЕЛОВЕЧЕСКАЯ ПАМЯТЬ

Совсем иначе работает память человека. Элементарное самонаблюдение подтверждает огромную важность так называемых ассоциаций. Стоит только задать вопрос: «Что вы об этом знаете?», как в мозгу начинается процесс, в котором каждое слово вызывает в памяти новое слово. То, чтó человек знает «об этом», не приходится разыскивать по адресу в каком-нибудь «ящичке» мозга. Здесь, по-видимому, работают многочисленные цепи, которые производят параллельные розыски информации на основе ассоциаций, образованных при запоминании всего, что относилось к этой теме. Разница между памятью, работающей по адресу, и ассоциативной памятью живых существ не количественная, а качественная. Было сделано несколько попыток создать запоминающие системы ассоциативного типа; они дают значительный выигрыш во времени, но за это приходится расплачиваться все возрастающим усложнением конструкции.

Нет ли еще более глубокого различия между памятью человека и памятью машины? В машине память точно локализована: можно увидеть своими глазами крохотные куски магнитного материала, составляющие элементарные клетки оперативной памяти или магнитную ленту долговременной памяти. Трудно устоять перед искушением найти аналогичные структуры и в человеческом мозгу, обнаружить, в каком специализированном отделе мозга хранятся запасы полученной информации. Однако все поиски в этом направлении заводили в тупик. В частности, хирур-

гия подтвердила, что даже в тех случаях, когда из-за травмы или серьезного заболевания удаляли значительную часть мозга, на память это практически не влияло. Не потому ли ускользает ответ, что вопрос поставлен неудачно? Может быть центр памяти не удается обнаружить просто потому, что память не локализована в определенной части мозга, а распределена более или менее широко по всей центральной нервной системе, как, например, в персептроне, где память о каждой категории образов, заключенная в целой серии цифровых значений коэффициентов, распределена равномерно. Локализованная память, работающая по адресу, прекрасно приспособлена для арифметических расчетов, и это доказано блестящей работой электронных вычислительных машин. А вот диффузная память, пожалуй, лучше подошла бы для машин, распознающих образ и принимающих решение в условиях сложного выбора. Если это действительно так, то для бионика открывается новое поле деятельности. Но подтверждается ли гипотеза диффузной памяти физиологическими данными?

Первые кибернетические исследования в области памяти опирались на следующую гипотезу: весь прошлый опыт материализован в мозгу в виде определенной цепи нейронов. Нейронов чрезвычайно много — десять миллиардов; количество элементов связи между нейронами, синапсов, в сто раз больше, то есть тысяча миллиардов. Человек с самым смелым воображением не возьмется перечислить все цепи, которые могут образоваться из этих десяти миллиардов нейронов, связанных тысячей миллиардов синапсов. Как же создается цепь, соответствующая данному количеству информации? Естественно предположить, что определенная чувственная информация возбуждает всегда одну и ту же цепь нейронов. От нейрона к нейрону возбуждение всегда передается по одним и тем же синапсам. Передавая возбуждение, синапсы модифицируются, и последующие импульсы передаются уже легче; таким образом, память может быть заключена в этих механизмах, облегчающих передачу импульсов. Действительно, подобные явления наблюдаются после продолжительного действия возбуждения, но они очень недолговечны: через несколько

минут, самое большее через несколько десятков минут, они исчезают. Значит, этим путем нам не удастся прийти к объяснению феномена памяти, потому что ее самый существенный признак — долговечность.

Вариантом той же гипотезы механизмов памяти, основанной на деполяризации на уровне синапсов, является предположение об «усиливающем» действии синапсов: многократное их возбуждение способствует росту новых нервных волокон и синаптических образований. И эти новые пути как-то дублируют основной

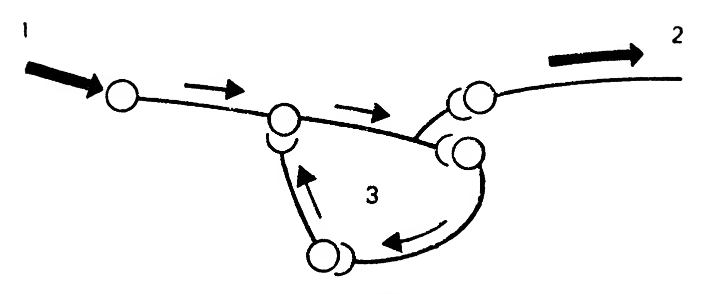


Рис. 56. Нейрональное кольцо циркуляции нервных импульсов. *1* — вход; *2* — выход; *3* — петля нейронов, по которой циркулирует возбуждение.

путь, усиливая действие приходящего импульса. Объяснение интересное, но физиологи ни разу не обнаружили ничего похожего на эти гипотетические новые разветвления. Ученые, увлеченные динамическим характером нервных импульсов, предложили иное объяснение: серия сигналов, передающих некоторое внешнее воздействие, продолжает циркулировать бесконечно долго в замкнутом контуре (рис. 56), где нейроны образуют кольцо. Этому утверждению ничто не противоречило бы, если бы не следующий эксперимент. А. Моро и Б. Рознер научили хомячков выполнять определенное действие. Затем их погрузили в спячку, перенеся в холодное помещение. Электрическая активность их нервной системы упала до нуля. Торможение было настолько глубоким, что даже сильное раздражение электрическим током не давало результата. Но когда через месяц хомячков, постепенно отогревая, вывели из состояния спячки, оказалось, что они ничего не забыли.

- Наука, на первый взгляд далекая от проблем памяти, тем не менее объясняет ее особенности. Эта наука — генетика. Несомненно, существует генетическая память, в которой заложены все признаки человека: высокий рост, темные волосы, голубые глаза, определенная форма носа и ушей и так далее — те тысячи отличительных особенностей, которые делают человека ни на кого не похожим и единственным в своем роде. Подробное определение всех этих признаков требует значительного количества информации. Теперь мы знаем, что эта информация огромна и содержится в ядрах клеток, из которых состоит живой организм, или, точнее, в гигантских молекулах нуклеиновых кислот. Представим себе молекулу нуклеиновой кислоты в виде фразы, составленной из четырех букв, где буквы — это очень простые химические вещества. Фраза эта будет настолько длинна, несмотря на относительно ничтожные размеры молекулы, что пересказать ее содержание можно только в тысячах печатных томов. Генетическая память основана на структуре химических веществ. Если вспомнить, что химические явления — неотъемлемая часть всех жизненных процессов, то естественно предположить, что и обыкновенная память имеет химическую природу. В таком случае материальной основой для записи новой информации было бы образование новых специфических веществ на клеточном уровне.

Чтобы поверить в истинность этой гипотезы, придется вспомнить некоторые любопытные эксперименты. Если память материализована в виде особых химических веществ, то для приобретения нового опыта, видимо, достаточно съесть другое существо, получившее этот опыт обычным путем. Такая перспектива приводит к мысли, что наука оправдывает каннибализм. Может быть, съев мозг врага, можно и вправду усвоить его ум? Но не следует торопиться с выводом — пища, съеденная человеком, никогда не переходит непосредственно в клетки организма. Сложные молекулы, полученные с пищей, расщепляются в процессе пищеварения на элементарные составные части; из этих элементов клетки строят химические

молекулы, характерные для организма человека. Информация, заключенная в сложных молекулярных структурах, не выдержит такой химической обработки.

Попытка экспериментально подтвердить гипотезу химической памяти обречена на неудачу во всех случаях, когда сложные молекулы разрушаются в процессе пищеварения. Нужно было найти такие организмы, которые непосредственно усваивали бы эти вещества, не разлагая их на элементы. Конечно, следовало обратиться к самым простым существам, находящимся на очень низком уровне развития. Прекрасный материал для таких опытов — планарии, плоские черви, обитающие в пресных водах. Они почти не эволюционировали, но все же у них есть головной ганглий, заменяющий мозг, и нервная цепочка, подобная спинному мозгу. Пищу они не переваривают, хотя имеют пищеварительную полость, а усваивают ее, как амеба, захватывая отдельные частицы. Клетки, из которых состоит планария, не так тонко специализированы, как клетки высших животных; их можно спокойно перемещать с одного конца тела планарии на другой. Клетки другой планарии тоже усваиваются в «непереваренном» виде. Это создает благоприятные условия для передачи без разрушения тех сложных химических молекул, в которых заключена приобретенная информация.

Но сначала нужно, чтобы было что передавать. А можно ли научить чему-нибудь примитивных червей? Как это ни странно, можно *. Экспериментаторы попытались выработать у планарий условный рефлекс — ведь это самая простая форма обучения. И это им удалось. Освещенная ярким светом планария вытягивается. Если в этот момент подвергнуть ее слабому удару электрического тока, она сокращается. Животное приучают к сочетанию яркого света и удара тока, и наступает момент, когда одно лишь воздействие света заставляет планарию сокращаться; это значит, что условный рефлекс выработан. В 1959 году У. Мак-Коннел, работавший тогда в Мичиганском университете, опубликовал результаты совершенно поразительного эксперимента.

* Процесс обучения свойствен и более низкоорганизованным животным.

Планарии способны регенерировать: из одного животного, разрезанного пополам, получаются два целых организма. Этот опыт Мак-Коннел провел с теми червями, у которых был образован описанный выше условный рефлекс. Оказалось, что две регенерировавших планарии сохраняли условный рефлекс, выработанный у первой планарии. Эти результаты вызвали живой отклик, и некоторые ученые поспешили объявить, что отныне загадка памяти решена. Через несколько лет, в 1962 году, Е. Джон и Мак-Коннел опубликовали еще более сенсационный материал. Обученных планарий разрезали на куски и скармливали необученным. В результате у последних экспериментаторы обнаруживали тот же условный рефлекс. Эти статьи вызвали много споров, потому что критерии, указывающие на наличие или отсутствие условного рефлекса, выбраны не совсем удачно: планарии все время двигаются и сокращаются даже без выработки условного рефлекса. Тем не менее эксперименты с каннибализмом были повторены многими учеными, так что их результаты вряд ли можно оспаривать *.

Совсем недавно Аллан Джейкобсон, Клиффорд Фрид и Шелдон Горовиц поставили на планариях другие эксперименты. Они не скармливали обученных червей необученным, а вводили им раствор нуклеиновых кислот, полученных из червей, прошедших обучение. И в этих опытах подтвердилась передача условных рефлексов.

Последние эксперименты, проведенные в Бейлорском университете (штат Техас) Ф. Унгаром и К. Осегера-Наварро, в общем сходны с предыдущими, только подопытными животными были неизмеримо более высокоорганизованные существа — крысы и мыши. Эксперимент был очень прост. Естественная реакция животного на громкий звук — прыжок, но если этот звук повторять очень часто, животное привыкает, и наступает момент, когда оно вообще не реагирует на звук. Крыс тренировали так: их приучали к ударам молотка о металлическую пластину. Удары следовали один за другим с интервалом в пять секунд в течение часа, а всего в день было два таких периода

* Однако этот вопрос до сих пор еще крайне спорен.

(получается примерно 1500 ударов в день). Через десять дней крысы привыкли к этому шуму и реагировали прыжком только на один удар из десяти. Затем обученных животных забили, а из их мозга сделали вытяжку и ввели ее белым мышам. Контрольной группе белых мышей вводили вытяжку из мозга необученных крыс. Экспериментаторы отметили, что животные первой группы приучались к шуму намного быстрее, чем контрольные, причем эта разница в их поведении была выражена очень резко. И хотя другие исследователи, пытаясь повторить эти или сходные с ними опыты, потерпели неудачу, не стоит спешить с отрицательными выводами; опыты такого рода очень трудно провести чисто, и множество мелких помех могут исказить результат.

Истолковать эти разнообразные эксперименты очень трудно. Все они доказывают, что между запоминанием информации и присутствием специфического сложного химического вещества существует какая-то связь. Эксперименты американских физиологов У. Дингмана и М. Шпорна позволяют проникнуть немного дальше в этом направлении. Эти ученые рассуждали так: новая информация хранится в памяти в форме сложных химических веществ, протеинов, которые должны вырабатываться в самих клетках. В синтезе протеинов принимают участие нуклеиновые кислоты, а именно — рибонуклеиновая кислота. Если искусственно нарушить синтез протеинов в клетке, это должно повлиять на способность запоминать новую информацию. Правильность этих рассуждений подтвердили следующие опыты.

В классических экспериментах по обучению животных используются лабиринты: животные должны как можно скорее найти выход из запутанных ходов. Крыс обучали ориентироваться в лабиринте, схема которого показана на рис. 57. Лабиринт был до половины заполнен водой, так что крысы его проплывали, а не пробегали. Крыс помещали у входа *А*, и они, чтобы выйти из лабиринта, должны были добраться до лесенки *Б*. Когда крысы были полностью обучены и в их памяти зафиксировался наиболее короткий путь к выходу, им вводили вещество, нарушающее синтез протеинов. На крыс это никак не подействовало:

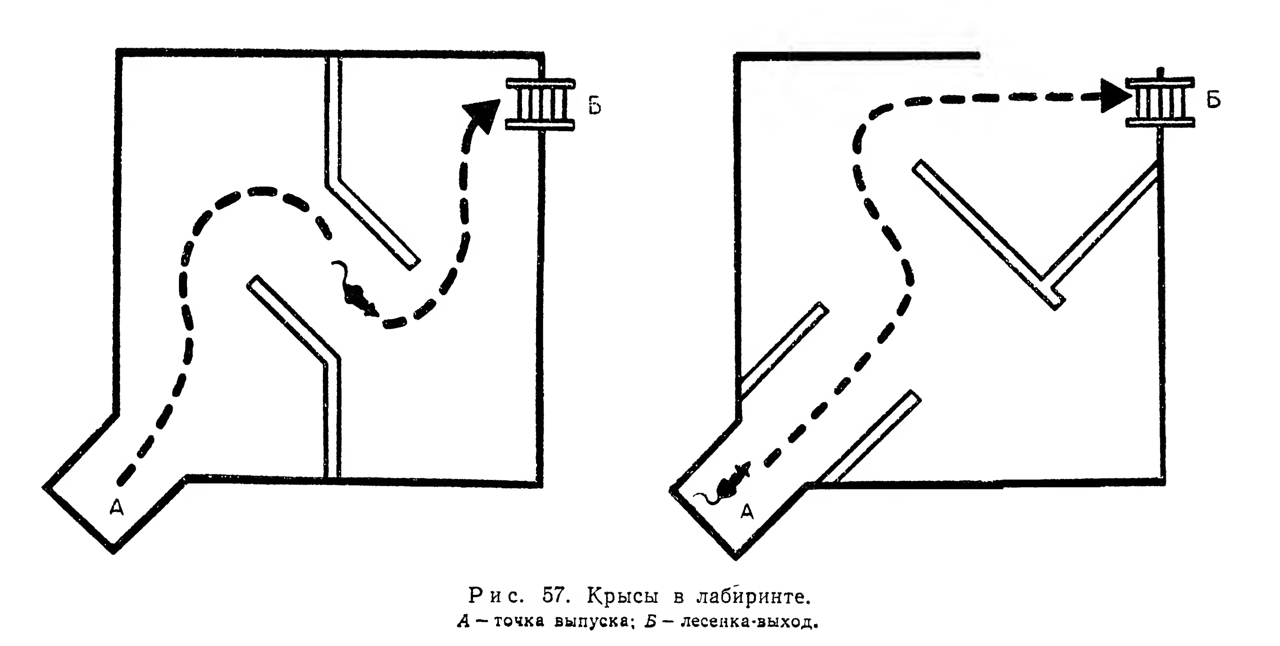


Рис. 57. Крысы в лабиринте.
А – точка выпуска; *Б* – лесенка-выход.

они по-прежнему быстро находили знакомый путь (пунктирная линия). Обучив еще одну группу крыс, экспериментаторы разделили ее на две подгруппы и животным одной из них опять ввели то же вещество. А затем всех животных снова поместили в лабиринт, но не в знакомый (правый рисунок), а в новый (левый рисунок). Его даже нельзя назвать незнакомым, потому что путь к выходу сохранял прежнюю форму. В принципе крысам оказалось достаточно нескольких попыток, чтобы освоиться в новом лабиринте. Здесь-то и проявилось влияние сделанных инъекций. Крысы, не получившие инъекций, быстро справились с задачей. Крысы другой группы совершенно растерялись: им потребовалось втрое больше попыток, чтобы научиться выходить из лабиринта. Но постепенно, по мере повторения различие между двумя группами начало стираться. Вывод прост и ясен: препятствуя процессу синтеза протеинов, мы не можем воздействовать на хранящуюся в памяти информацию: нарушается только возможность запоминания свежей информации.

Но если продолжать блокаду синтеза протеинов, это приведет к более тяжелым последствиям. Флекснер констатировал, что через десять дней животные начинают забывать не только путь в лабиринте, но и многое другое. Это можно было бы объяснить тем, что протеины, составляющие основу памяти, должны постоянно возобновляться. К сожалению, все обстоит гораздо проще: блокируя действие рибонуклеиновой кислоты, управляющей синтезом протеинов, мы ухудшаем состояние всего организма, и нельзя с уверенностью сказать, что́ именно вызывает изменение поведения — потеря памяти или патологические нарушения более общего характера.

Есть и другие указания на связь памяти с химическими веществами. Животные обучаются гораздо медленнее, если им вводить вещества, угнетающие организм, например барбитураты. Существуют вещества, которые, наоборот, повышают восприимчивость, стимулируя центральную нервную систему; к ним относятся стрихнин, кофеин, фенамин. Эти вещества всегда применяются непосредственно во время опыта (некоторые из них более эффективны, если их вводить

перед опытом, другие — сразу после опыта). Такое действие связано с тем, что существует по меньшей мере два типа памяти: долговременная и кратковременная.

КРАТКОВРЕМЕННАЯ И ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ПАМЯТЬ

Кратковременная память хорошо знакома психологам. Они измеряют ее количеством цифр или слогов, которое человек запоминает с первого раза. Для чистоты опыта цифры следуют в полном беспорядке, а слоги не составляют слов, их порядок должен быть лишен всякой логики. Емкость кратковременной памяти невелика — всего 7—8 слогов, но она удивительно постоянна для каждого индивида. Физиологическим субстратом такой кратковременной памяти может служить остаточная деполяризация синапсов.

Определенная часть информации отбирается и передается на хранение в долговременную память. Но это требует некоторых усилий. Информация должна получить структуру, ассоциироваться с уже известной или близкой к ней информацией. Трудно объяснить, в какой форме хранится эта информация; образ любимого человека в памяти едва ли напоминает фотографию этого человека. Нервная система извлекает из массы чувственной информации основные черты, по-настоящему важные и характерные; в память они помещаются довольно экономно. В этой связи возникает естественный вопрос: известна ли нам полная емкость человеческой памяти? Этот вопрос неправильно сформулирован, потому что для ответа нужно точно знать физиологическую природу материального субстрата памяти. Его можно поставить иначе: какое количество информации человек может воспринять (а значит, и запомнить) за всю свою жизнь? На этот вопрос уже есть ответ. Многочисленные эксперименты показали, что человек может обработать один бит информации в три сотые доли секунды. Правда, это кладет пределы познавательной способности человека, но, к счастью, они довольно широкие.

Если человек может обработать примерно 20 битов информации в секунду (постоянно сохранять полное внимание невозможно), это значит, что он

способен оценить 2^{20}, то есть миллион, различных возможностей в секунду. Если работать в этом ритме четырнадцать часов в день (мы берем крайний случай), то в день можно обработать миллион битов. За пятьдесят лет среднее число составит примерно восемнадцать миллиардов битов. Необходимость хранить эту информацию далеко не исчерпывает количество возможных комбинаций всех элементов нервной системы. Французский физик Ж. К. Леви показал, что для этого достаточно тысячной доли общего числа нервных клеток. Человек отыскивает в памяти нужную информацию в среднем за несколько десятых секунды; значит, скорость этого поиска должна быть около пятидесяти миллиардов битов в секунду. Лучшие из современных запоминающих устройств отыскивают за одну пятидесятую секунды информацию, записанную на магнитных дисках, вращающихся со скоростью пятьдесят оборотов в секунду. Емкость такой памяти — примерно миллиард битов. Человек и машина в настоящее время отыскивают информацию с равной скоростью, но техника в этой области очень быстро прогрессирует, так что она может обогнать человека.

Запись информации в памяти человека принципиально отличается от записи в искусственной памяти. В машине материал классифицируется по адресу, в нее достаточно ввести информацию один раз и в любом порядке. В человеческой памяти необходимо установить ассоциации, которые впоследствии помогут отыскать эту информацию. Так налаживается связь между кратковременной и долговременной памятью, на этой важнейшей стадии восприимчивость к внешним помехам повышена. Мы уже познакомились с химическими веществами, тормозящими процесс запоминания. На него могут влиять и другие факторы. В 1949 году С. Дункан отметил влияние электрошока на обучение крыс в лабиринте. Если крысы подвергались электрошоку через несколько часов после тренировок, это не сказывалось на их поведении. Но если электрошок наступал всего через пять минут после окончания тренировки, крысы начисто забывали все, чему научились. Заметное влияние электрошока наблюдалось в интервале до пятнадцати минут после

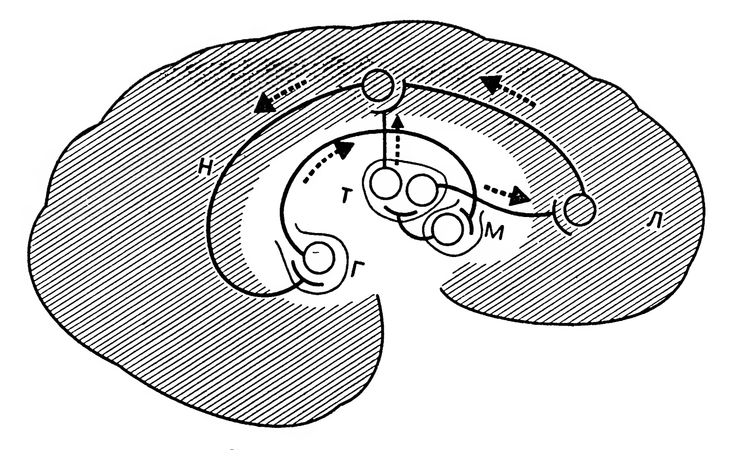


Рис. 58. Кольцо Папеца.

Н — нейронные цепи; *Г* — гиппокамп; *Т* — таламические ядра (зрительные бугры); *М* — маммилярное тело; *Л* — лобные доли коры головного мозга.

окончания тренировки. Эти и многие другие эксперименты показали, что в процессе передачи информации в долговременную память важную роль играют нервные импульсы, потому что нарушение их передачи электрошоком нарушает и передачу информации. Возможно, страдает так называемое нейрональное кольцо, показанное на рис. 56. Кольцо играет всего-навсего роль передатчика. Физиологи подтверждают возможность существования такого кольца. Его схема (кольцо Папеца) дана на рис. 58; кольцо включает в себя зрительные бугры, куда обязательно передается вся чувственная информация (кроме обонятельной), гиппокамп и ряд других отделов мозга.

Существенная роль этого кольца в передаче информации из кратковременной памяти в долговременную подтверждается патологической физиологией. Изучение последствий травм всегда было важнейшим методом в науке: разрушая орган или связь между органами, можно наблюдать явления, которые при этом возникают. Совершенно ясно, что здоровому человеку никто не решится нанести подобные травмы, но нередко сама болезнь производит в мозгу разрушения, которые обнаруживаются при вскрытии. Видов заболеваний памяти, или амнезии, много;

некоторые из них весьма причудливы: больной, например, прекрасно помнит все, что с ним случалось раньше, но абсолютно не способен запомнить новые события. Он никак не может привыкнуть к своей палате и не узнает своего врача. Вскрытие показывает, что этот вид амнезии связан с нарушениями в области гиппокампа: они прерывают циркуляцию информации по кольцу Папеца. Экспериментальная физиология подтверждает данные патологической. Опыты на осьминогах показали, что их примитивный мозг является превосходной естественной моделью. В нем можно вызывать соответствующие нарушения и наблюдать сходные последствия.

Из всего сказанного вытекает вполне достоверный вывод: кратковременная память представляет собой деполяризацию на уровне синапсов, которая сочетается с циркуляцией нервных импульсов по определенным замкнутым контурам. Для закрепления информации в долговременной памяти, необходимо, по-видимому, чтобы она достаточно долго циркулировала по реверберирующему контуру, подобному кольцу Папеца. Что получается при таком повторяющемся возбуждении? Оно, несомненно, влияет на синтез молекул протеинов, которые служат субстратом долговременной памяти. Заметим, что состав этих сложных химических веществ не отличается большим разнообразием. Материальная основа запоминания образа представляет собой кольцо клеток, измененных присутствием специфических протеинов. И это, кстати сказать, исключает заманчивую возможность передавать знания путем инъекций протеинов.

Выше мы задавались вопросом: рассеяна ли память человека по всей нервной системе? Похоже на то, что теперь мы имеем право утвердительно ответить на этот вопрос. А это уже шаг вперед. Инженер-бионик может и должен найти здесь новые идеи, применение которых в конструировании вычислительных машин обещает быть чрезвычайно интересным. Теперь попытаемся ответить на другой вопрос: как объяснить громадную емкость человеческой памяти? Зависит ли она от того, что нейроны сгруппированы в высокоорганизованные структуры, или от того, что они связаны между собой какими-то необъяснимыми

связями? Ответа на вопрос пока что нет, хотя сейчас ведутся очень активные исследования в этой области, так что успех, по-видимому, не за горами. Но сначала нужно гораздо глубже изучить проблему хранения информации.

РОЛЬ НЕЙРОГЛИИ

Говоря о нервной системе, мы, конечно, имеем в виду нейроны. Но нейроны не существуют в пространстве сами по себе; они занимают ничтожную по объему часть нервной ткани, основную массу которой

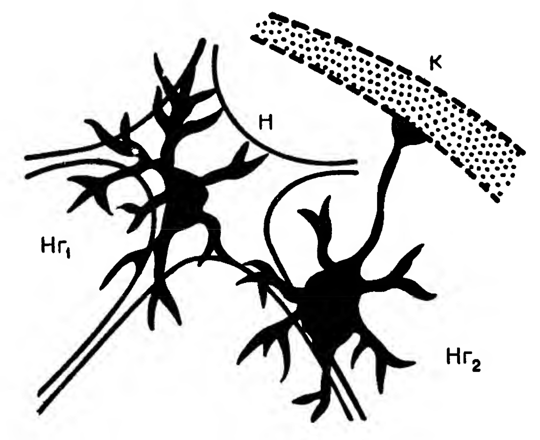


Рис. 59. Нейрон и нейроглия.
Н — нейрон; *Нг* — клетки нейроглии; *К* — капилляр.

составляют клетки, формирующие так называемую нейроглию. Более ста миллиардов клеток нейроглии непосредственно прилегают к десяти миллиардам нейронов и обволакивают их (рис. 59). Из-за того, что к клеткам нейроглии подходят капилляры, пронизывающие вещество мозга, долго считали, что они главным образом обеспечивают питание нейронов. Привлекает внимание одна любопытная особенность мозговой ткани: в ней практически нет свободного межклеточного пространства, нет никаких полостей между клетками нейроглии и нейронами. Когда в нейроне возникает импульс, наблюдается обмен ионов

между внутренней и внешней средой клетки; при этом внешней средой обязательно оказывается клетка нейроглии. Значит, эти клетки никак не могут играть чисто пассивную роль; нервная активность возникает в результате непосредственного взаимодействия клеток двух типов. Не исключено, что это объяснение, горячо поддерживаемое американским ученым Р. Галамбосом, прольет свет на вопрос, который вот уже пятьдесят лет ставит в тупик всех, кто изучает память. Дело в том, что нейроны — быстродействующие элементы, их действие измеряется тысячными долями секунды, а у памяти совсем иные масштабы времени — от нескольких секунд, нужных для адаптации чувствительных клеток, до нескольких часов или даже лет. Может быть, медленные явления, феномены памяти, связаны именно с нейроглией?

В 1953 году Г. Светихин, освещая глаза рыб, наблюдал в сетчатке появление биоэлектрических сигналов, продолжительность которых измерялась целыми секундами или даже минутами. В 1961 году он определил, что этот эффект зависит от клеток нейроглии. Профессор Г. Хиден из Гетеборгского университета в Швеции обнаружил, что в процессе обучения возникают симметричные и взаимосвязанные изменения в нейронах и в прилегающих к ним клетках нейроглии. Эти изменения в нервных клетках и натолкнули его на химическую гипотезу памяти. В 1965 году доктор Л. Герц из Копенгагенского университета предположил, что наряду с обычной передачей возбуждения по аксону существует химический обмен ионами по цепи нейрон — клетки нейроглии — нейрон. Смысл этого процесса расшифровал в 1961 году Р. Галамбос. Он смог объяснить, почему введение в мозг веществ, нарушающих функции клеток нейроглии, вызывает реакцию всего организма, изменяя его общее состояние; почему бывают «удачные» дни, когда все идет хорошо, и «неудачные», когда, наоборот, все совершенно не клеится без видимых причин.

Схема на рис. 61 показывает возможный путь взаимодействия нейронов с клетками нейроглии. Когда нейрон (H_1) деполяризуется, он выбрасывает в окружающую среду поток ионов калия. Эти ионы абсорбируются ближайшей клеткой нейроглии *Нг* и пере-



Рис. 60. Микрофотография клеток нейроглии в головном мозге человека. Связана ли память с клетками нейроглии?

даются по цепи $Нг_1$, $Нг_2$, $Нг_3$ до контакта с мембраной другого нейрона ($Н_2$). При этом они видоизменяют поляризацию нейрона и облегчают его последующее возбуждение под влиянием серии импульсов, поступающих через синапс (*С*). Необходимо вспомнить, что в отличие от электронных машин, где для пуска в ход достаточно одного-единственного импульса, нейроны всегда требуют серии импульсов. Это связано с тем, что в нервной системе информацию несет не присутствие или отсутствие импульса, а внутренний ритм,

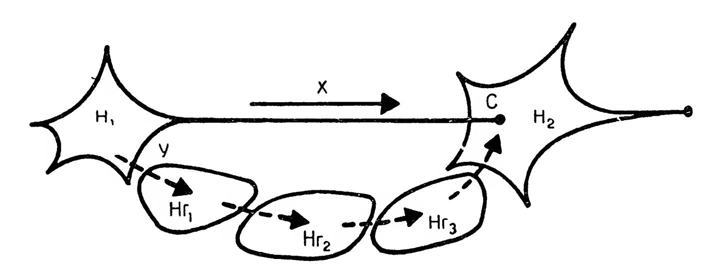


Рис. 61. Одна из возможностей взаимодействия нейрона с нейроглией.

Н — нейроны; *С* — синапс; *Нг* — клетки нейроглии; *X* — путь передачи импульса; *Y* — возможный путь химической передачи.

или частота, серии импульсов. Схема связи, изображенная на рис. 61, аналогична некоторым связям в персептроне. Коэффициенты *W* персептрона подобны химическим вариациям, которые могут возникнуть при химической передаче возбуждения через клетки $Нг_1$, $Нг_2$, $Нг_3$.

Долговременная память, таким образом, может быть представлена химическим веществом, содержание которого в клетках нейроглии регулирует скорость перемещения ионов. Значит, переход от кратковременной памяти к долговременной происходит вследствие появления этого вещества под влиянием перемещения ионов калия и проявляется в циркуляции нервных импульсов, связанных с определенным раздражением.

Согласно этой гипотезе, клетки нейроглии содержат нечто вроде программы действия нервной системы, а нейроны выполняют эту программу. Напомню,

что это пока только гипотеза и она нуждается в экспериментальном подтверждении. В частности, нужно прежде всего разрешить один вопрос: почему в отличие от нейронов, которые с самого рождения живого организма никогда не делятся и не изменяются в течение всей его жизни (и, что гораздо хуже, порой умирают раньше), клетки нейроглии постоянно обновляются? Как это увязать с постоянством памяти? А может быть, этот процесс обновления и разделения лежит в основе способности человека обобщать все, что он знает. И конечно, бионик не может спокойно пройти мимо идей, открывающих перед ним перспективы создания самоорганизующихся машин, возможности которых будут поистине безграничны.

ГЛАВА 11

ИСКУССТВЕННЫЙ РАЗУМ

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ

Память — важнейшее, неотъемлемое свойство человека. И все же часто приходится слышать такие фразы: «Да тут ничего страшного нет, это надо просто-напросто запомнить!» Такими утверждениями мы

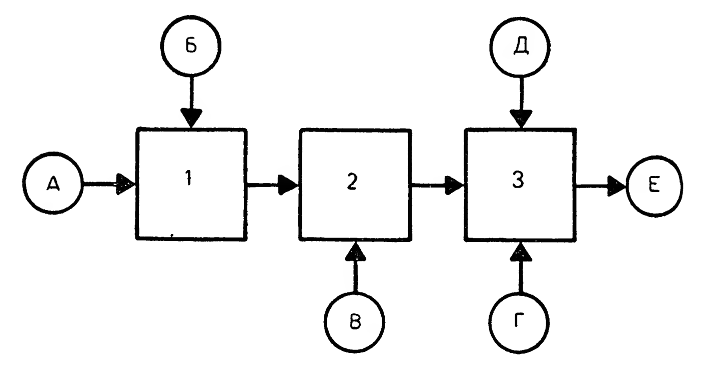


Рис. 62. Процесс принятия решения.

1 — отбор информации; *2* — распознавание образов; *3* — оценка возможностей выбора.
А — внешняя среда; *Б* — критерии цели; *В* — память, хранящая образы; *Г* — память, хранящая результаты прежних решений; *Д* — критерии выбора; *Е* — решение.

бессознательно противопоставляем память как механическое свойство разуму — этому благородному качеству, которое делает человека человеком, то есть позволяет ему свободно принимать решения. Но хотя окончательный выбор в процессе принятия решения нам кажется наиболее важным только потому, что он окончательный, это всего лишь часть решения, последний этап длинного процесса, который мы попытались схематически изобразить на рис. 62.

В любой внешней среде присутствует огромное количество потенциально доступной информации. Нет необходимости принимать в расчет всю эту информацию. В каждом конкретном случае, чтобы разрешить

вопрос: «А не пойти ли нам погулять?», совсем ни к чему знать цены на уголь, а нужно знать, какая будет погода. Но если предстоит решить, заменять ли в системе центрального отопления уголь на нефть, вопрос о ценах на уголь становится решающим. Таким образом, первый шаг в любом процессе принятия решения (*1*) — это выделение необходимой информации из всей массы доступной информации. Факторы, влияющие на выбор, зависят от конечной цели. Наиболее точно и в то же время обобщенно можно сказать, что выбор определяется критериями цели (*Б*). Когда необходимые аспекты информации выделены, их нужно организовать, а результаты классифицировать путем соотнесения с уже существующими категориями. Это задача органа распознавания образов (2). Мы подробно разбирали характеристики этого процесса в предыдущей главе и знаем, что память играет в нем ведущую роль; кроме того, мы помним, что у высокоорганизованных существ этот процесс включает распознавание образов и анализ ситуации с участием памяти, хранящей прежние образы (*В*), и памяти, хранящей результаты предыдущих решений (*Г*). Когда проведена оценка ситуации, можно сделать окончательный выбор (*Е*). Этот выбор определяется не только предварительным анализом ситуации, но и рядом других критериев (*Д*) — готовностью рисковать или желанием играть наверняка, осторожностью или поисками наибольшего выигрыша при минимальных потерях.

Может показаться, что мы слишком подробно разбираем процесс принятия решения, но все же стоит поразмыслить над тем, какие стадии он проходит. Чтобы создать машину, способную принимать решения, недостаточно довести ее до фазы «распознавание образов и анализ ситуации», придется сделать еще шаг и дойти до фазы «окончательный выбор». И здесь бионик тоже может принести большую пользу. Мы видели, как живые существа разрешают проблему отбора информации в органах чувств, как у них происходит распознавание образов с помощью опыта, полученного при обучении, какими особенностями отличается их память. И вот новая тема: каким образом человек принимает решения и как он использует при

этом все богатство предоставленных ему возможностей? Изучение методов, которыми пользуется природа, поможет нам определить функции искусственных механизмов, которые должны находить правильное решение в сложных ситуациях.

Чтобы разобраться в этом, лучше всего начать с простого примера. Хозяйка собирается приготовить омлет. Пять яиц уже разбиты и находятся в большой чашке, где их будут сбивать. Осталось разбить последнее, шестое яйцо, как вдруг ее зовут к телефону. Чтобы не терять времени, хозяйка просит мужа разбить шестое яйцо и сделать омлет. Чего уж проще! И все же, если немного подумать, сделать это не так просто. Конечно, шестое яйцо можно разбить о край большой чашки и присоединить к первым пяти. Но если оно тухлое — пропал весь омлет. Лучше уж взять чистую чашку и разбить яйцо над ней. Но тогда придется еще и чашку мыть. Чтобы избавиться от всей этой лишней работы, не проще ли без долгих рассуждений выбросить яйцо в мусоропровод?

Итак, перед нами три возможности выбора — разбить яйцо над большой чашкой, разбить его над чистой чашкой и потом перелить в большую или сразу выбросить — и два возможных состояния яйца — свежее оно или несвежее. Отсюда — шесть возможных результатов. Уяснив себе данные задачи, сведем их воедино:

Выбор действия	Состояние яйца	
	А. Яйцо свежее	*Б.* Яйцо несвежее
1. Разбить яйцо над большой чашкой	Омлет из 6 яиц	Омлет пропал
2. Разбить яйцо отдельно и перелить	Омлет из 6 яиц и грязная чашка	Омлет из 5 яиц и грязная чашка
3. Выбросить яйцо	Омлет из 5 яиц	Омлет из 5 яиц

Математик назвал бы эту таблицу матрицей задачи. Выбор действия зависит от определенных правил поведения, или от общего взгляда на жизнь. Оптимист выбрал бы первый способ, лентяй предпочел

бы третий, а осторожный человек — второй. Ситуацию можно еще усложнить: вместо одного яйца нужно разбить два, то есть последовательно сделать два выбора. Возможное число результатов — уже не шесть, а шестью шесть, то есть тридцать шесть. Таблица возможных результатов усложнится. И все же это очень простой случай: три возможности выбора и два возможных состояния яйца. Легко привести бесконечно более сложные примеры, скажем игру в шахматы.

Количество возможностей выбора после каждого хода и количество ходов во время игры, как кажется, совершенно исключают предварительную оценку всех последовательных результатов. Но при этом в шахматах учитываются только точно известные и строго определенные данные: положение фигур и пешек перед каждым ходом и правила, согласно которым передвигаются фигуры. Если человеку не под силу проверить все возможности выбора в будущей партии, почему бы не предложить эту задачу электронной машине? В решении такой задачи все может быть механизировано. Ограничения здесь только пространственные, потому что количество возможных партий можно записать числом 1 со ста десятью или ста двадцатью нулями (некоторые авторы расходятся в оценке, но при таких цифрах лишние десять нулей — просто пустяки!). Несмотря на то что электронной машине достаточно одной десятимиллионной доли секунды, чтобы проанализировать результаты каждого хода, полное решение этой задачи займет миллиарды веков (число, которое записывается единицей с девяноста пятью нулями), так что практически оно неосуществимо. А все-таки люди играют в шахматы. Как же они ухитряются это делать? Этот вопрос стоит того, чтобы им заняться, потому что приемы шахматистов могут пригодиться при создании машин, принимающих решения в сложных ситуациях. Анализ шахматной игры выходит далеко за пределы возможностей этой книги. Нас интересует не частный случай, а то, как человек вообще принимает решения. Поэтому вернемся к нашим омлетам.

Вместо таблицы — или, точнее, матрицы — всех возможных результатов, которые вытекают из условий и последовательности выбора, обратимся к более

удобному графическому методу (рис. 63). На первом уровне принятия решения существует три возможности выбора. Вспомним их:

1. Разбить яйцо прямо над большой чашкой, в которой уже находятся все другие яйца.

2. Разбить яйцо отдельно в маленькую чашку и, если оно свежее, вылить его в большую.

3. Выбросить яйцо.

На графике это изображается при помощи трех линий 1, 2 и 3, которые выходят из одной точки, представляющей исходные условия.

Каждый выбор влечет за собой осуществление одной из двух возможностей:

А. Яйцо свежее.

Б. Яйцо несвежее.

Продолжаем каждую линию, изображающую выбор, двумя линиями *А* и *Б*, соответствующими указанным возможностям. Так мы приходим к шести конечным ситуациям. Каждая из конечных ситуаций первого этапа (с первым яйцом) служит исходной ситуацией второго этапа (со вторым яйцом). Повторив ту же графическую ситуацию еще раз, получаем разветвленный график решений, или дерево решений. Слово «дерево» хорошо объясняет процесс: от общего корня — исходной ситуации — отходят ветви — последовательные решения и возможности, которые возникают вследствие того или иного выбора.

Это графическое изображение в форме дерева очень выразительно. Оно позволяет сразу увидеть, в результате какой последовательности решений и выбора возможностей достигается определенный конечный результат. Кроме того, мы видим, какие ветви перестают развиваться в процессе действия. В примере с омлетом это происходит, когда действуют по методу 1 (яйцо разбивают сразу в большую чашку). Тогда, если яйцо окажется плохим (случай *Б*), оно испортит все содержимое чашки. Если требовалось разбить два яйца, то, как показывает дерево, возникают не шестью шесть, то есть тридцать шесть, конечных возможностей, а только тридцать. Но самое главное заключается в том, что схема в виде дерева позволяет увидеть воочию естественный путь принятия решений у человека.

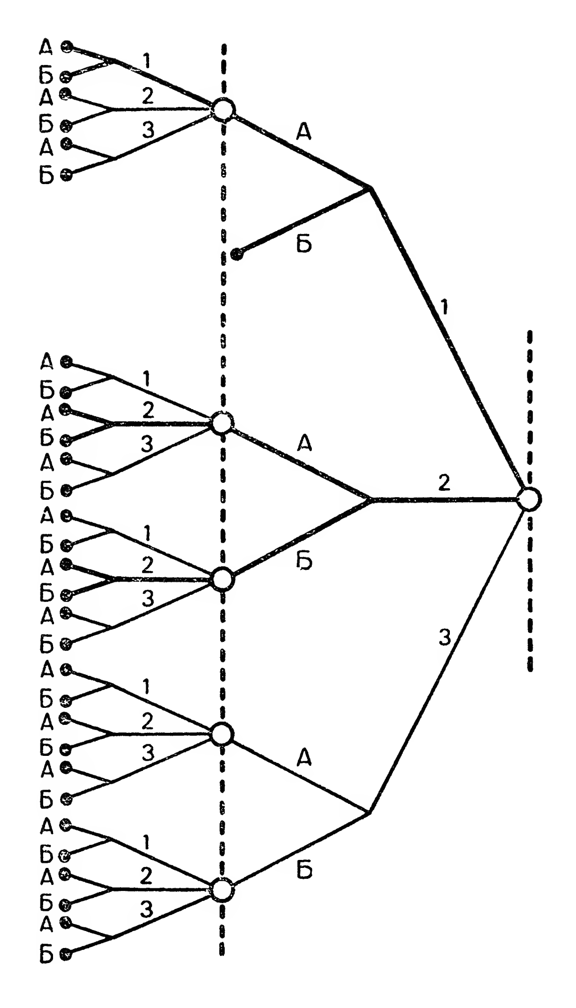


Рис. 63. Дерево решений задачи с омлетом.
1, 2, 3 — возможные действия; *А, Б* — состояние разбитого яйца.

Рис. 63 показывает все без исключения пути к принятию решения на второй стадии. Но если мы сразу выберем метод 2 (смирившись с тем, что, кроме большой чашки, придется вымыть и маленькую), было бы нелогично после этого предпочесть метод 3 (выбросить яйцо) или даже метод 1. В последнем случае мы ничего не выигрываем: так или иначе придется мыть вторую чашку, а если яйцо окажется плохим, мы рискуем потерять весь омлет. Если с самого начала избран метод 2, то естественно сделать тот же выбор и для второго яйца. И еще одно замечание: хотя теоретически вполне допустимо выбросить яйцо, едва ли найдется такой сказочный лентяй, который пойдет на это. Значит, мы можем практически пренебречь методом 3. И наконец, выбрав метод 1, вполне логично придерживаться его и в дальнейшем, потому что если перейти, например, ко второму методу, то придется мыть чашку — не лучше ли сразу выбрать это решение? В результате этих рассуждений можно значительно упростить дерево решений, оставив только ветви, показанные более жирными линиями. Вместо тридцати возможных конечных ситуаций остаются всего шесть. Это дает существенную экономию мыслительной энергии. А в случае с тремя яйцами эта экономия значительно возрастает — всего 10 результатов вместо 150.

Изображение полного дерева решений требует строго дедуктивного процесса: производится систематическое исследование всех возможностей выбора и вероятных результатов. Исключение лишних ветвей, которое приводит к упрощенному дереву, — это, наоборот, процесс по преимуществу интуитивный и синтетический. Еще не зная результата в деталях, человек путем определенных предположений априори исключает некоторые пути как наименее интересные. В этом примере (разумеется, упрощенно) проявляются неоспоримые преимущества интуитивного поиска перед чисто аналитическими и дедуктивными рассуждениями. Игра в шахматы или в бридж тоже в основном требует приложения правил интуиции. В общем и целом все действительно оригинальные проявления человеческого интеллекта — от решения отдельных задач до создания рабочих гипотез — связаны с интуицией.

Обычно задачи, которые дают электронным машинам, решаются при помощи дедуктивного процесса и представляют собой четко определенный порядок последовательных операций. Насколько это ограничение принципиально и можно ли ждать от машин интуитивных действий? Да, машины могут овладеть интуицией. Специалисты по электронно-вычислительной технике называют работу на основе интуиции эвристическим методом в противоположность алгоритмическому, дедуктивному и упорядоченному, методу. Что означают эти непривычно звучащие слова? Слово «эвристика» происходит от греческого глагола heuriskō — «отыскивать», «воображать», «изобретать»; все это подразумевается в понятии интуиции. Слово «алгоритмический» появилось гораздо раньше, еще в средние века. Это искажение имени знаменитого арабского ученого IX века, автора известных трактатов по математике Мухаммеда Ибн Мусы аль Хорезми. Его имя так часто повторялось, что в конце концов стало обозначать всякие письменные вычисления в отличие от подсчетов на счетных досках и других приспособлениях. Если только данная задача имеет решение, его всегда можно получить алгоритмическим методом. Теоретически это надежный метод, но на практике он иногда неприменим, потому что требует непомерных затрат времени и труда. Эвристический метод позволяет найти точное или приближенное решение, но может и привести в тупик. Ценность эвристического метода доказывается практикой: он себя достаточно часто оправдывает, приводя к правильному решению намного быстрее, чем алгоритмический метод.

РАЗУМ И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

О думающих машинах, об электронном мозге писалось достаточно много. Несмотря на поразительную скорость работы электронных машин, в них нет ни крупицы разума, если речь идет о чисто дедуктивной алгоритмической работе. Нужно ли подчеркивать эту сторону, называя машину разумной? Если машина способна работать эвристически, на основе интуиции, не лучше ли перевернуть вопрос и осмелиться употребить вошедшие в привычку слова «искусственный

разум»? Это почти всегда вызывает возмущение. Как можно вообще соединять эти два слова? Нам скажут, что разум и машина с ее механической работой — несовместимые противоположности. Это возмущение можно понять, но все же оно скорее эмоционально, чем разумно. Вместо того чтобы возмущаться, лучше немного поразмыслить.

Начнем с самого начала — что же такое разум? Эрудиция и память — скорее механические качества, это еще не разум. Уже много раз решенная задача тоже не требует участия разума. Разум в полном смысле слова связан с возможностью свободного выбора, и это относится к разным случаям, от многочисленных решений, которых жизнь требует ежеминутно, до великих открытий. Свободный выбор — это победа над случайностью; чем выше уровень антислучайности, тем более развитого разума он требует. С этой точки зрения «искусственный разум» выглядит нелепо: ведь машина делает только ту работу, которую ей задали, у нее нет никакой возможности сделать выбор, который не был бы всецело предопределен заранее, значит, она не может быть разумной. Логика этого заключения кажется безупречной. Но нет ли в нем слабого места?

Обсуждение этого вопроса возможно только при одном условии. Если считать (или даже подразумевать), что разум — это свойство непостижимое и таинственное, нематериальное и притом специфически человеческое, то, конечно, соединение двух слов — «разум» и «искусственный» — лишено всякого смысла. С этих позиций подходить к проблеме бесполезно. Гораздо вернее рассмотреть ее эмпирически, наблюдая поведение человека и машины. Эту точку зрения высказал в 1950 году английский математик и логик А. Тьюринг. Предположим, что перед исследователем находится «нечто». Исследователь ставит вопросы, и это «нечто» (человек или машина) дает ответы. Исходя из анализа этих ответов, ученый решает, с чем он имеет дело — с человеком или с машиной. И если он решит: «человек», а ответы на самом деле давала машина, то, по-видимому, уже можно говорить о разумности этой машины. Само собой разумеется, что эксперимент должен быть орга-

низован так, чтобы исключалась всякая подсказка по внешним признакам: исследователь находится в изолированной комнате, он задает вопросы, печатая их на машинке, и получает ответы в той же форме.

Тем не менее критерий Тьюринга трудно применим. Его истинная ценность заключается в том, что он наводит на размышления о проблеме и тем самым утверждает очень важный факт: нельзя говорить о наличии или отсутствии разума, просто это качество проявляется в разной степени. Следовательно, удачно подобрав условия эксперимента, можно с помощью критерия Тьюринга добиться нужного результата. Если, например, сравнить интуицию Планка или Эйнштейна с автоматическим устройством, составляющим платежные ведомости, всякое упоминание о разуме машины будет звучать насмешкой. Но дело обстоит иначе, когда речь заходит о машинах, играющих в шахматы или доказывающих геометрические теоремы. Особенно в последнем случае трудно уйти от этой проблемы и приходится снова и снова искать ответ на вопрос об искусственном разуме.

Безусловно, машина, играющая в шахматы, не может быть организована только на алгоритмических принципах, связанных с последовательностью дедуктивных операций. Необходимо ввести в нее некоторую долю интуиции, которая бы позволяла машине действовать эвристически. Как это сделать? Снова возвращаясь к примеру с яйцами для омлета, вспомним, что интуиция приводит к эвристическому методу, который опирается на следующее правило: придерживаться одного образа действий на протяжении всей цепочки последовательных решений — разбивать яйцо над большой чашкой, если вы готовы рискнуть, или над отдельной, если вы осторожны (информация о том, какой процент яиц может оказаться испорченным — а это довольно редкое явление, — позволит априори составить мнение о рациональности каждой из двух возможностей выбора). Наблюдая поведение человека в более общих случаях, можно изучить другие эвристические методы. Это исследование полностью в духе бионики: применять в конструировании машин открытия, сделанные в мире живых существ.

Перейдем теперь к другому, более общему случаю — посмотрим, как ученик решает элементарную задачу по геометрии. Возьмем следующее условие: дан равнобедренный треугольник с вершиной *A*. Два других угла, *B* и *C*, разделены биссектрисами *BD* и *CE*; требуется доказать равенство треугольников *ABD* и *ACE*. Прочтя условие задачи, ученик прежде всего чертит треугольник (рис. 64). Затем он проверяет все следствия, вытекающие из условия задачи, потому

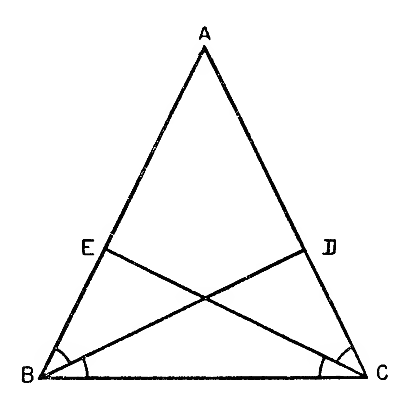


Рис. 64. Простой пример геометрической задачи: доказать равенство треугольников *ADB* и *AEC*.

что именно они могут пригодиться для доказательства. Треугольник *ABC* равнобедренный, с вершиной в точке *A*. Значит, стороны *AB* и *AC* равны. Равны также и углы при основании, а так как линии *BD* и *CE* являются биссектрисами равных углов, углы *ABD* и *ACE* также будут равны. На этом этапе ученик вспоминает признаки равенства треугольников. Первый признак равенства треугольников заключается в том, что если две стороны и угол между ними одного треугольника соответственно равны двум сторонам и углу между ними другого треугольника, то такие треугольники равны между собой. Треугольники равны и в том случае, когда сторона и два прилежащих к ней угла одного треугольника соответственно равны стороне и двум прилежащим к ней углам другого треугольника. Первый признак здесь

применить нельзя, потому что мы ничего не знаем о сторонах *BD* и *CE*. Но второй признак подходит, потому что к равным сторонам *AC* и *AB* прилежат равные углы: угол *A* является общим для треугольников *ABD* и *ACE*, а равенство углов *ABD* и *ACE* вытекает из условия задачи.

Группа американских психологов и математиков, в которую входили А. Ньюэлл, Дж. Шоу и Г. Саймон, на основе продолжительных наблюдений и анализа полученных данных пришли к следующему общему выводу. Когда предстоит решить какую-нибудь задачу, ее надо свести к задачам, решение которых известно. Для этого ее подразделяют на несколько действий до тех пор, пока не приходят к уже известной задаче. После этого первого шага нужно вернуться назад и обратным путем прийти к искомому решению. Удивительно то, что этот анализ не обнаруживает ничего особенного. Каждый элементарный шаг чрезвычайно прост, и все эти шаги логически вытекают один из другого. Но может возникнуть вопрос: а не скрывается ли за этим сознательным и очевидным поведением нечто подсознательное, некая таинственная сила, которая и играет основную роль в решении задач?

МАШИНЫ, РЕШАЮЩИЕ ЗАДАЧИ

Эти аргументы, однако, не подтверждаются практикой. Ньюэлл, Шоу и Саймон на основе своих экспериментов создали общий принцип, который позволяет применять машины для решения некоторых задач. Главная загадка столь противоречивого вопроса, как решение задач, заключается, как ни парадоксально, в том, что здесь нет ничего загадочного; все понятно, рационально и легко автоматизируется. При этом применяют простой метод, включающий в основном три приема: замена задачи *a* задачей *б*, более простой и абстрактной; сведение к минимуму различий между задачами *б* и *б′* и, наконец, решение задачи *б′* с помощью известных правил. Из всех этих приемов и складывается эвристический метод. Для того чтобы электронная машина работала по этому методу, достаточно точно определить иерархию

различных приемов и заложить в память машины несколько элементарных результатов.

Другой известный эвристический метод можно назвать «шаг за шагом». Смысл его очень прост: чтобы решить сложную задачу, ее подразделяют на последовательные этапы. Например, при игре в шахматы каждый ход представляет собой такой этап. Решение обычно находят на первом этапе, не думая об остальных. После первого шага находят решение на втором этапе, и так далее. Конечно, нельзя поручиться, что окончательный ответ, полученный в результате такого нанизывания последовательных решений, будет наилучшим, но во всяком случае может оказаться, что он не так уж плох.

Электронная машина, имеющая эвристическую программу, может, вероятно, решать не только простые цифровые задачи. Схема, данная на рис. 55, в принципе сохранится, если вместо цифр машина будет оперировать какими-нибудь символами, например логическими посылками *A*, *B*, *C*. Рабочая часть машины приспособлена не только для цифровых расчетов, она может производить и операции формальной логики. Например, если *A* верно, а *B* является следствием *A*, то *B* тоже верно. Или так: если *A* верно, то противоположное *A* не верно. Эти и подобные им операции позволяют автоматически проводить абстрактные расчеты, гораздо более обобщенные, чем простые цифровые вычисления. Если для последних применяют только алгоритмический метод, то логические операции могут управляться как чисто алгоритмическим, так и эвристическим методами.

Но вполне естественно возражение, что в любом случае метод, который применяет машина, задуман человеком и, даже если это эвристический метод, машина никогда не сможет превзойти человека. Совершенно верно. Но нельзя забывать, что машина работает неизмеримо быстрее. А со временем, возможно, будут достигнуты еще лучшие результаты. Что дает человеку знания? Обучение. Значит, можно не записывать в памяти машины результаты, нужные для элементарных решений, а заставить ее прийти к ним с помощью процесса обучения. Тогда возможности машины сразу резко возрастут. Заметим, что эти раз-

говоры о будущем недалеки от реальности, потому что подобный метод обучения уже применяется в некоторых машинах, играющих в шахматы. Но тем не менее, как мы уже видели, процессы обучения в машинах до сих пор очень элементарны и базируются в основном на простых условных рефлексах. До типа обучения, доступного человеку, им еще очень далеко.

Не потому ли воплощения искусственного разума не всегда оправдывают надежды своих создателей? Возможно. Вполне вероятно и то, что причины надо искать глубже. Утверждение, что человек решает сложную задачу путем расчленения и применения большого количества элементарных приемов, — это только гипотеза, известная в психологии под названием ассоциативной. Ей издавна противопоставляется другая гипотеза — гештальт-психология. Согласно этой гипотезе, необходимо рассматривать процессы глобально, не расчленяя их на простые элементы.

Может быть, главная задача изысканий в области искусственного разума заключается в том, чтобы провести экспериментальную проверку этих гипотез. Здесь неудачные эксперименты так же важны, как и успешные. Если вернуться к процессу решения задач, самый простой эксперимент показывает, что в нем надо различать две фазы: вначале — создание общей структуры решения задачи (фаза структурализации), а затем — детально разработанное решение.

Что касается первой фазы, человек пока еще вне конкуренции, однако на втором этапе — при поиске решения — первенство держит счетная машина. Но она совершенно неспособна осмыслить плохо сформулированную задачу, и это препятствие неустранимо, если сама информация расплывчата и неясна.

Человек определяет структуру задачи, по-видимому, таким образом: он оценивает задачу в целом, интуитивно находит возможные подходы к решению, намечает структурный план, а затем переходит к трудоемкой фазе решения, причем часто меняет первоначальное решение и ищет новых подходов к задаче. У человека есть принципиальное преимущество перед вычислительной машиной: нечеткость формулировок ему не мешает, он может изменять свои критерии, различать существенное и несущественное,

перемещать отдельные элементы в контексте. Итак, успехи и неудачи опытов с искусственным разумом вполне объяснимы. Как заметил Х. Дрейфус в своей блестящей критической статье, четкость фазы структурализации всегда обеспечивала успех, а затруднения именно на этой фазе приводили к поражению.

Но признание этих поражений ни в коем случае не должно давать повод считать все опыты с искусственным разумом утопией. Напротив, их нужно проводить еще более настойчиво, потому, что они, без сомнения, положат начало увлекательным открытиям.

Перед нами самое многообещающее приложение бионики: понять, наконец, природу человеческого разума и создать машины, неизмеримо более совершенные, чем современные вычислительные устройства.

Придется, конечно, от простейших структур, схему которых мы разобрали выше, перейти к машинам более сложным, заменив единый блок оперативной памяти и отдельный блок, производящий расчеты, целой системой взаимосвязанных органов. Кстати, в этом направлении уже достигнуты некоторые успехи: появляются устройства, представляющие собой комбинацию нескольких гигантских вычислительных машин, которые действуют вместе в полном согласии. Такова, например, система машин ЮНИВАК-1108. Выход из строя одного элемента сети не нарушает работы машины в целом. Более того, встроенное в систему наблюдательное устройство автоматически сигнализирует о том, какой элемент неисправен.

Но нам предстоит искать еще дальше, чтобы создать машины, где память и логика расчетов будут нерасчленимо связаны в каждой части машины, как и в нервной системе человека, где многочисленные цепи работают одновременно (а не последовательно, в порядке прочтения инструкций программы), и различные результаты мгновенно сравниваются на выходе. Может быть, процесс, который мы называем подсознательным, и представляет собой как раз такой глобальный процесс в противоположность последовательному процессу логического анализа?

Неужели человек действительно будет свергнут с трона владыки разума роботами, которых он создаст своими собственными руками? Некоторые писатели

чрезмерно увлеклись этой мыслью. И все-таки не стоит бояться. Человек — существо, наделенное поистине несравненной способностью к приспособлению. Вряд ли эта новая ступень эволюции составит исключение. Долгие века, до появления паровых машин, механизация труда практически отсутствовала. Первые попытки механизации были встречены настоящими бунтами с человеческими жертвами. Рабочие громили машины, которые грозили, как им казалось, отнять у них хлеб насущный *. А на деле машины помогли поднять уровень жизни, сократить рабочее время и перейти к более человеческим условиям труда. Мы живем в эпоху второй индустриальной революции, в эпоху автоматизации повседневных функций разума. И сейчас, как при введении машин в XIX веке, иногда возникают возражения, но в конце концов всем придется признать, что сделан шаг вперед. Освобождая себя от второстепенных функций, человек может посвятить свое время разрешению более ценных и интересных проблем. Грядет и третья революция — механизация самого тонкого процесса, процесса принятия решений. Уйдет ли на это двадцать лет или всего десять, а может быть, и того меньше? Темпы развития науки так ускоряются, что все попытки предсказаний бессмысленны. Но в одном можно не сомневаться: человек приспособится и к этой новой революции, как уже сумел приспособиться к предыдущим, и извлечет из нее пользу. В XIX веке один математик вычислил число π до семисотого знака; в наше время приходится признать, что он зря потерял время, — гораздо разумнее было бы употребить его на разработку общих принципов действия вычислительных машин. Современным машинам ничего не стоит вычислить это число до стомиллионного десятичного знака, а это уже, бесспорно, превышает все возможности обычных «кустарных» расчетов. Не рискуем ли и мы услышать такой же упрек от людей XXI века? Они могут сказать, что разумнее было бы как можно скорее разрешить общую проблему — проблему решения задач. Ньюэлл, Шоу и Саймон

---

* Автор не анализирует причин этого явления, характерного для капиталистического способа производства.

заявили, что нет никакой необходимости привлекать в этом случае подсознательные процессы. Чтобы доказать это, они создали на основе своих эмпирических исследований проект машины, которая будет безукоризненно решать определенные задачи. Так машина сможет занять свое настоящее место, не подменяя человека, а помогая ускорить эволюцию мира.

ГЛАВА 12

ЖИЗНЬ И ЭНЕРГИЯ

ЭНЕРГИЯ И ЕЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

Живые существа — замечательные системы обработки информации, прекрасные прототипы машин, предназначенных для той же цели. Но тем не менее признание решающей роли информации не должно заставлять нас забыть о другом важном аспекте — энергии, одинаково нужной и живым организмам и машинам. Еще в самом начале книги мы говорили о том, что именно в царстве энергии бионика сделала свои первые шаги задолго до того, как получила официальное признание. Вспомним летательные машины Леонардо да Винчи и Адера, моделью которых послужило крыло летучей мыши. Аспект «энергии» мы находим и в наши дни в одном из последних приложений бионики: искусственное покрытие подводных лодок, увеличивающее их скорость, прямо копирует устройство кожи дельфина. Какие еще темы для размышлений можно найти в этой области — в области энергии и ее превращений? Не владеют ли живые существа секретом высокоэффективного преобразования энергии?

Проблема преобразования энергии — одна из насущных проблем современной цивилизации. Индустриальная революция опиралась на преобразование тепловой энергии, полученной от сжигания угля, в механическую — движение маховика паровой машины. В наше время наиболее удобный вид энергии — электричество, которое легко преобразуется в другие виды энергии. Было бы очень интересно получать электрическую энергию прямо от химических реакций сжигания, минуя сложные цепи топок, охладителей, турбин и генераторов. Одно решение уже существует — это топливные элементы, использованные в кабине космического корабля системы «Джеминай». Но нужно еще много сделать, прежде чем процесс будет индустриализован и станет экономически

выгодным. А животные, осуществляющие такое преобразование энергии, и в значительном количестве, есть — это электрические рыбы. Может быть, они подскажут нам новые бионические идеи, осуществимые в технике. Их пока еще нет, но это вовсе не значит, что в этой области никогда не найдется ничего интересного.

Циклы энергетических превращений в растительной и животной клетках интересны со всех точек зрения, но эти процессы специфичны для живой материи. Какие же проблемы здесь возникают? Кроме основных источников энергии (для растений это солнечная энергия, для животных — пища), живое существо должно получать энергию, необходимую для поддержания всех жизненных процессов, в доступной ему форме. Так как энергия усваивается органами живого существа неравномерно, для хранения накопленных запасов необходимы приспособления: сахара и жиры для долговременного хранения, сложные соединения фосфора — для кратковременного. Но жизнь сталкивается с неразрешимой на первый взгляд задачей: живые молекулы — это чрезвычайно сложные и сравнительно непрочные химические соединения. Стоит их, например, нагреть, как они распадаются и с жизнью покончено. Всякая химическая реакция сопровождается выделением тепла, и, если процесс связан с большими количествами энергии, это выделение тепла может погубить живой организм, вместо того чтобы поддерживать его жизнь. Как же разрешить это противоречие?

Вот пример такого решения для растительной клетки. Солнечное излучение не что иное, как поток частиц энергии — фотонов. Когда фотон поглощается растительной клеткой, говорят, что она пришла в состояние возбуждения. Что это значит? Каждая молекула — это соединение атомов, которые в свою очередь состоят из ядер и периферических электронов. В покое электрон движется по орбите на определенном расстоянии от ядра. Чтобы выбить электрон с орбиты, нужно снабдить его некоторым количеством энергии, но положение его на новой, более удаленной орбите неустойчиво: возбужденный электрон всегда стремится вернуться на прежнюю орбиту. Совершая этот прыжок, он возвращает энергию, которая понадоби-

лась, чтобы удалить его от ядра. А может быть и так: возбужденный электрон не сразу возвращается на прежнюю орбиту, а проходит целый ряд последовательных ступеней, связанных с цепью сложных химических превращений молекул. Энергия, освобождающаяся на каждом этапе, составляет ничтожную часть полной энергии фотона. Таким образом, ни одна из этих реакций не несет больших количеств энергии, которые могли бы грозить саморазрушением сложным молекулам, участвующим в этих реакциях. Когда весь путь последовательных частичных излучений энергии завершен, энергетический цикл живой материи замыкается.

Нет необходимости входить в подробности энергетического цикла растений, где главную роль играет хлорофилл, или энергетического цикла животных, протекающего в митохондриях — этих миниатюрных цехах размером не более тысячной доли миллиметра. Ведь искусственные механизмы не будут страдать от ограничений, присущих живой материи; машины могут работать при более высоких температурах, и весь сложный каскад реакций здесь совершенно не нужен.

Хотя природные феномены захватывающе интересны, они в общем и целом не дают бионику интересных тем. «В общем и целом» — это значит, что возможно и исключение, интересное для бионика. Такое исключение представляет собой совершенно особый феномен: биологический свет. Тайна свечения насекомых — светлячков и тропических щелкунов, некоторых морских моллюсков привлекает и манит ученых. Почему? Искусственный свет, созданный человеком, не позволяет полностью использовать энергию. Потери энергии всегда значительны и сопровождаются выделением большого количества тепла. А живой свет, который по праву можно назвать «холодным», имеет стопроцентный коэффициент полезного действия. Именно эта особенность и может зажечь воображение бионика. Разве эта природная модель не заслуживает внимания? И может быть, ее удастся скопировать (потому что в этой области речь идет скорее о копии, чем о теме для обобщений).

Скажем сразу, что возможно и непосредственное использование живого света в качестве освещения.

На разлагающейся мертвой рыбе размножаются светящиеся бактерии. Этих бактерий можно собрать, поместить в питательную среду и получить своеобразную лампу. На Антильских островах для той же цели помещают в сетку несколько светляков. Но живые фонарики не выдерживают конкуренции с электрическими, да и экономически это невыгодно.

Следует упомянуть еще одно использование холодного света. В Японии есть маленькие ракообразные, которым ученые присвоили неблагозвучное имя *Cypridina hilgendorfi*. Их высушивают и растирают в порошок, который при увлажнении испускает слабый свет. Во время второй мировой войны японские солдаты ночью при таком свете ориентировались по карте. Этот свет, вполне достаточный для чтения карты, не настолько ярок, чтобы привлечь внимание противника. Ни одно из этих применений не относится к бионике, хотя в общем бионика может предъявить на них свои права. Действительно, интересно было бы сконструировать источники холодного света того же типа, что и природные. Возможно ли это? Чтобы ответить на вопрос, нужно сначала узнать, откуда берется живой свет.

Если вы спросите об этом биолога, он ответит, что явление биологического свечения очень широко распространено. Светятся бактерии, грибы, некоторые кораллы, черви, моллюски, ракообразные, кальмары и, наконец, рыбы. Но на этой ступени придется остановиться: нет ни светящихся амфибий, ни ящериц и — заранее можно сказать — нет светящихся птиц или млекопитающих. Феномен связан только с низшими формами жизни, и это очень ценное указание: как видно, это очень древний процесс, который был отброшен на пути эволюции. Химические реакции, лежащие в основе процесса, прекрасно изучены: происходит разложение определенных органических веществ, называемых люциферинами. Мак-Элрой и Зелигер исследовали эти вещества у светляка и попытались их синтезировать. На чистом люциферине подтвердилось и предположение о стопроцентном использовании энергии на свечение — это поистине холодный свет. Но авторы полагают, что сам процесс люминесценции — всего-навсего почтенное ископаемое. Несколько

Рис. 65. Шампиньоны, сфотографированные при дневном освещении (вверху), ночью испускают лучи, которые действуют на фотопластинку (внизу).

миллиардов лет назад в атмосфере Земли не было кислорода. Первые живые организмы были анаэробными, то есть не нуждались в кислороде. Но постепенно за миллионы веков кислород накапливался в атмосфере, и прежде всего — в результате разложения молекул воды под действием ультрафиолетового излучения Солнца. Этот процесс мог происходить потому, что все лучи Солнца достигали земной поверхности, а в наше время именно благодаря кислороду большая часть активного ультрафиолетового излучения задерживается в верхних слоях атмосферы экраном из озона (активный атомарный кислород). Кислород не был нужен примитивным организмам, наоборот, он был для них ядом, который нужно было как можно скорее обезвредить и вывести из организма. Самый простой процесс — связать кислород, превратив его в воду. При этой реакции выделяется большое количество энергии, которая может быть использована для свечения. Постепенно в ходе эволюции живые существа приспосабливались к новым условиям; кислород из яда, который выбрасывался организмом, превратился в главный источник жизни. Но некоторые виды сохранили этот примитивный механизм.

Если объяснение правильно (а оно по крайней мере правдоподобно), то сам факт эволюционной непригодности этого процесса говорит не в его пользу. Действительно, до сих пор он не нашел практического применения, разве что созданный синтетическим путем люциферин пригодится в химических источниках холодного света. Но с точки зрения рентабельности этот процесс вызывает сомнение.

МЫШЦА — ТРАНСФОРМАТОР ЭНЕРГИИ

Еще интереснее и важнее явление преобразования химической энергии в механическую. Оно происходит в органе, который представляет собой почти такое же удивительное творение природы, как нейрон. Это — мышца. Мышца очень сложна и в то же время удивительно проста. Даже поверхностный осмотр показывает, что мышца имеет волокнистое строение и волокна состоят из чередующихся светлых и темных дисков. При сокращении мышц светлые диски

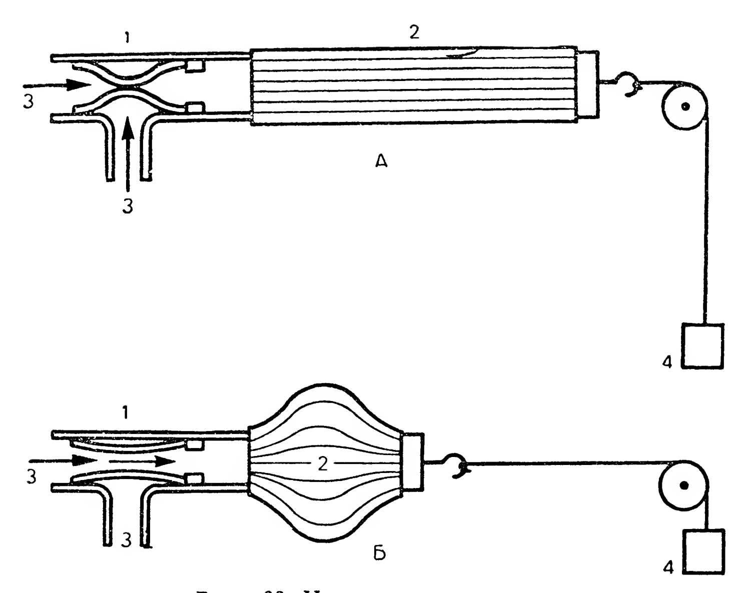


Рис. 66. Искусственная мышца.

А — расслабленная; *Б* — сокращенная.
1 — клапан; *2* — оболочка из жесткого и эластичного материалов; *3* — поступающий под давлением воздух; *4* — поднятый груз.

как бы сжимаются. М. Болдуин, Дж. Уайт, Р. Брайн и С. Висце из лаборатории по изучению сенсорных систем в Таксоне (Аризона) создали простую модель такого двухсоставного волокна. Это трубка, стенка которой состоит из двух материалов разной эластичности, например из стеклянных волокон, залитых каучуком. Как показано на рис. 66, этот искусственный мускул можно наполнить воздухом под небольшим давлением. Стеклянные волокна сохраняют прежнюю длину, но не мешают трубке растягиваться в толщину, поэтому она сокращается и поднимает груз (*4*). Подача воздуха регулируется клапаном, работающим по тому же принципу. Если подача воздуха ритмически прерывается, искусственная мышца ритмически сокращается и удлиняется. Это движение можно преобразовать во вращательное с помощью классического кривошипа. Получается своеобразный двигатель.

Это хорошая, но все же очень примитивная модель настоящей мышцы. Более интересную модель

мышцы создал А. Качальский. Активный элемент этой модели — протеин, точнее коллаген, вещество, входящее в состав кожи и связок (в хирургии оно используется под названием «кетгут»). Коллаген имеет винтообразную структуру, напоминающую спиральную пружину, его нити очень тонки: не более од-

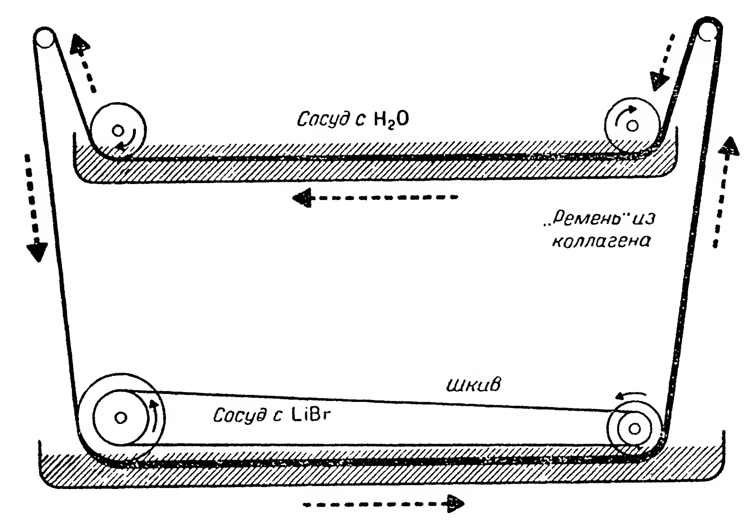


Рис. 67. Мышечный мотор Качальского.

Он представляет собой «приводной ремень» из коллагеновых волокон, проходящий то через сосуд с раствором бромистого лития, то через сосуд с дистиллированной водой. Коллаген сжимается в растворе бромистого лития, а в сосуде с водой приобретает прежнюю длину. Когда коллаген сжимается, «ремень» тянет вниз ролик слева, а он в свою очередь передает движение через шкив на ролик справа. Этот процесс продолжается до тех пор, пока в сосудах сохраняется раствор бромистого лития и чистая вода, а усилие от любого ролика может быть использовано для работы в машине.

ной десятой миллиметра. Если волокна коллагена поместить в раствор бромистого лития, они быстро сокращаются, поднимая при этом вес в тысячу с лишним раз больше собственного. Если затем удалить бромистый литий — промыть волокна в чистой воде, — их длина становится прежней. Здесь нет остаточных деформаций, и процесс сокращения и расслабления может повторяться почти бесконечно. На этом принципе и основан мотор Качальского (рис. 67). Эта бионическая модель еще будет совершенствоваться, но уже сейчас ясно, что она очень интересна, так как

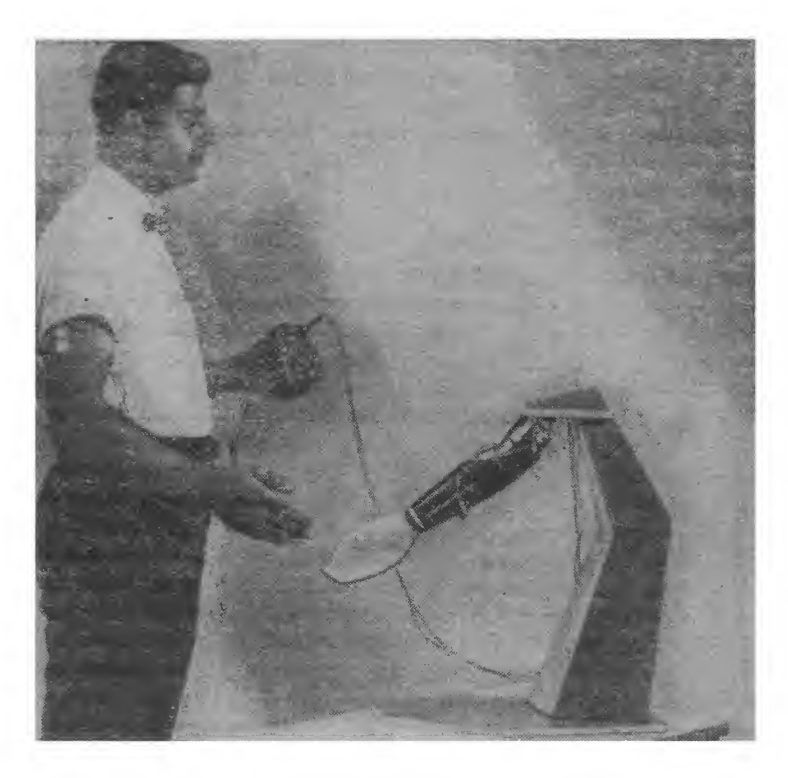


Рис. 68. Изучив нервные механизмы, управляющие мышцами, ученые создали эту искусственную руку.

обладает большим коэффициентом полезного действия.

Надо помнить, что природный мотор, мышца, намного сложнее, и прежде всего потому, что управляется хорошо разработанной системой нервных сигналов. Отметим попутно весьма интересное применение этой системы сигналов в искусственных конечностях. Идея была подана Н. Винером, успешно разрабатывалась в СССР, а в настоящее время искусственная рука сделана и в Великобритании. Основная идея заключается в следующем. Пальцы человеческой руки двигаются под влиянием импульсов, циркулирующих в нервах предплечья. Даже если человек потерял руку, оказывается, можно уловить эти импульсы,

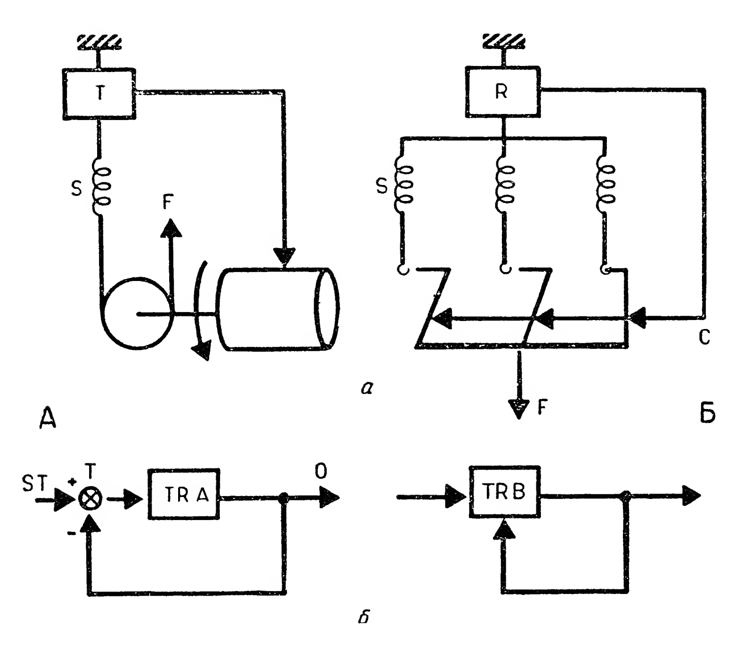


Рис. 69. Классический сервомеханизм *А* и мышечный сервомеханизм *Б*.

а — механические схемы; *б* — эквивалентные схемы.
T — орган измерения; *R* — чувствительные нейроны; *F* — действие двигателя; *S* — пружины, действующие в обратном направлении; ST — совокупность сигналов на входе; *O* — связь с мотором; *TRA* — фиксированная передаточная функция; *TRB* — переменная передаточная функция.

декодировать их, а затем усилить. Полученные электрические импульсы управляют моторами, встроенными в искусственную руку. Это, несомненно, область применения бионики, тем более что искусственная рука почти точно повторяет природную модель. Но помимо протезов этот принцип применим и в иных случаях, например при ускорениях, в несколько раз превышающих земную силу тяготения. Механизмы помогут человеку действовать в сложных условиях, добавляя свою силу к силе его мышц.

Изучение действия мышц имеет еще некоторые интересные для бионика аспекты. Управление мышцами можно изучать на кибернетической модели, в которой учитываются механические характеристики мышц

и связанных с ними рецепторов. Эти опыты натолкнули французского ученого Ж. Ришале на неожиданные открытия. В системе, которая называется сервомеханизмом, петля обратной связи отлажена так, что на вход машины подаются данные, пропорциональные результату на выходе (рис. 69, *А*). Можно представить себе такую систему в виде мотора, натягивающего пружину с помощью приводного ремня, надетого на ролик оси мотора. Но для осуществления такой схемы необходимо включать в петлю обратной связи усилители, а мы уже знаем, что биологических усилителей не существует. Нужно найти приспособление, которое могло бы обойти это препятствие. В этом отношении мышца представляет собой сервомеханизм особого типа. Результат на выходе не действует непосредственно на вход; как показано на рис. 69, *Б*, он действует на передаточную функцию сервомеханизма, а это уже нечто новое. Можно создать механическую схему, в которой многочисленные пружины сокращались бы одна за другой. Такая схема точно соответствует физиологической гипотезе мышечного сокращения, выдвинутой недавно доктором Дэвисом: по мере того как мышца сокращается, возникают все более многочисленные перемычки между волокнами актина и миозина, из которых состоят светлые и темные диски. Эти волокна входят друг в друга, подобно сочленениям подзорной трубы; возникающие между ними перемычки имеют электрическую природу. Модель Ришале — прекрасный пример взаимосвязи бионики и кибернетики. Выявляя новые возможности конструкции сервомеханизмов, кибернетическая модель сама по себе представляет интерес для дальнейшей работы бионика.

ГЛАВА 13

ПЕРСПЕКТИВЫ БЕЗГРАНИЧНЫ

Бионика обещает принести интересные результаты и в мире энергии и в мире информации. Это подтверждается тем, что мы только что рассмотрели. Что же самое интересное в бионике? В первой главе мы говорили об одном из основных признаков бионики — о том, что это наука-перекресток. Бионика осуществляет совершенно новый подход к проблемам жизни и техники, потому что она свела воедино интересы биолога, психолога, математика и инженера. Эта ее особенность становилась все яснее по мере того, как мы осваивались с миром бионических идей; мы все больше убеждались в том, что в отличие от специальных наук бионика не имеет четко очерченных границ, а, наоборот, захватывает новые рубежи по мере развития специализированных наук, на которые она опирается. По самой своей природе бионика не из тех наук, которые преподают в пределах одного академического курса. Самое важное в ней — это особый подход к изучению жизни и технических проблем. Это утверждение, может быть, покажется кое-кому спорным, но тем не менее в нем заключается самая суть бионики.

Бионика явилась плодом общих усилий — аналитической деятельности биологов и синтетической деятельности инженеров. Это систематизация изучения функций живых механизмов, подчиненная задаче их воплощения в искусственных конструкциях.

Чтобы бионика существовала, необходимо разрешить проблему взаимопонимания специалистов, пришедших из таких отдаленных друг от друга областей науки, как биология и техника. И тут прежде всего необходим общий язык. Начало формирования такого языка будет уже огромным шагом вперед. Не нужно преуменьшать трудности этого шага. Чтобы содружество инженера с биологом стало реальностью, каждый из них прежде всего должен научиться правильно

задавать вопросы на общем языке, понятном каждому собеседнику.

Правильно поставленный вопрос уже отчасти содержит в себе ответ. Но чтобы научиться это делать, приходится долго обсуждать предварительные вопросы. Их необходимо задавать и обсуждать, какими бы наивными или нелепыми они ни казались. Если инженер, специалист по вычислительной технике, спросит биолога: «В какой части мозга локализована память человека?» — вопрос прозвучит наивно, но его достоинство в том, что он очерчивает проблему. Постепенно, общими усилиями собеседники смогут сформулировать правильный вопрос, и это принесет пользу обоим. Только надо быть осторожнее — даже в правильном с виду вопросе иногда таится ловушка.

Мозг удивительно надежен в работе. Какие процессы обеспечивают эту надежность? Нельзя ли скопировать их в электронных машинах? Как будто бы с этим вопросом все в порядке, а на самом деле он поставлен плохо, потому что здесь как бы само собой разумеется, что мозг и машина работают одинаково. А мы уже убедились, что это вовсе не так. Плохо поставленный вопрос вызывает бесконечные прения, потому что каждый собеседник, не понимая другого, тут же переходит на свой технический жаргон. Между ними разверзается пропасть, и из такого спора ничего хорошего не выйдет, потому что точки зрения спорящих слишком далеки друг от друга. Можно сказать, что установление взаимопонимания и плодотворного единства — это и есть бионика.

Бионика уже доказала свою жизнеспособность. Она станет еще сильнее в будущем, когда расширит свои исследования. Первые свои победы она одержала в области прямого применения биологических открытий в технике. Но как бы интересны ни были полученные результаты, самую плодотворную для бионика работу можно найти не в области копирования. В природе надо искать скорее руководящие идеи, чем модели для подражательного копирования. Заметим, что в области энергетики, как правило, появляются именно копии или прямые повторения, а общие идеи становятся особенно ценными, когда мы переходим

к проблемам информации, несравненно более многочисленным и сложным.

Кибернетика выдвинула на первое место понятие информации. Поведением управляет не энергия, а информация. Большинство разобранных нами тем относится к информации и ее обработке: получение информации органами чувств; предварительная обработка сырой информации, как это происходит в сетчатке глаза; циркуляция информации по сложным сетям коммуникаций, как, например, в нервной системе; хранение информации в памяти; процессы обучения и принятия решений.

Конструирование машин для обработки информации переворачивает всю экономику нашего времени, всю нашу жизнь, потому что постепенно принятие решений в особенно сложных обстоятельствах передается, хотя бы отчасти, вычислительным машинам. С этой точки зрения бионика приобретает исключительное значение. До этого ей было бы далеко, если бы она ограничилась только вопросами энергетики, даже в такой интересной области, как искусственные конечности. Возможности развития самообучающихся машин и искусственного разума фантастичны — без преувеличения. А в далеком будущем воображение рисует совершенно сказочные возможности. Не просто конструировать машины, опираясь на природные модели, а создавать искусственную жизнь, подобную настоящей. Да, перспективы бионики поистине безграничны.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Люсьен Жерарден

БИОНИКА

Редактор *Р. В. Дубровская*
Художник *Ф. Инфантэ*
Художественный редактор *Ю. Л. Максимов*
Технический редактор *А. Г. Резоухова*
Корректор *А. Ф. Рыбальченко*

Сдано в набор 29/IX 1970 г.
Подписано к печати 28/I 1971 г.
Бумага № 3 $84 \times 108^{1}/_{32}$=3,63 бум. л.
Усл. печ. л. 12,18. Уч.-изд. л. 10,97. Изд. № 12/5600
Цена 52 коп. Зак. 810.

ИЗДАТЕЛЬСТВО „МИР"
Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ордена Трудового Красного Знамени
Ленинградская типография № 2
имени Евгении Соколовой Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Измайловский проспект, 29

За страницами учебника

sheba.spb.ru/za

Хочу всё знать (теория)

Юный техник (практика)

Домоводство (условия)